

博士論文

低照度／不鮮明なカラー画像に対する
RGB色空間の等色相平面における
画像強調法に関する研究

(A Study on Image Enhancement on Equi-hue Plane in RGB
Color Space for Low-light/Unclear Color Image)

令和6年3月

向田 眞志保

山口大学大学院創成科学研究科

論文要旨

近年、スマートフォンやタブレットといったカメラ付き端末の普及が進み、カラー画像を容易に取り扱うことが可能になった。これに伴い、カラー画像の画質向上に関する様々な手法が開発されている。カラー画像では色によって情報が表現される。色は、「色相」「彩度」「明度」の三つの属性から構成される。色相は色味の性質、彩度は鮮やかさ、明度は明るさを表す。これらの三属性は多くの人にとって理解しやすい色の物差しである。一方、工学的な面では、加法混色の三原色である赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) を三属性とした RGB 色空間が広く使用されている。そのため、デジタル画像処理は RGB 色空間で行われることが望ましい。しかし、RGB 成分の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。例えば、もっと鮮やかにしたい場合、RGB 色空間の三成分のうち、どの成分をどれだけ変化させたらよいかは感覚的にはわからない。そのため、色相、彩度、明度の三成分から構成される色空間に一度変換し、そのいずれかを変更し、再び RGB 色空間に変換することが行われている。しかし、場合によっては変換後の色が RGB 色空間の表示可能領域 (色域) から逸脱する「色域問題」が発生することがある。RGB 色空間のみで処理を完結することができれば、この不都合を解消することができる。これに対し、RGB 色空間上で色域を保証しつつ、色相を変えることなく、明度コントラストおよび彩度を同時に強調する手法がいくつか提案されてきた。従来の方法は適度な光量の下で撮影された画像に対しては、効果的な強調結果を得ることができるが、暗い環境下で撮影された低照度画像に対しては効果が限定的であった。この他、RGB 色空間上の色域内での処理を保証しつつ、色相を保ちながら詳細部を強調する手法もいくつか提案されてきた。しかし、これらの手法はコントラストや彩度を強調することができるが、詳細部の強調効果が弱いという問題があった。そのため、不鮮明な画像に対しては効果が限定的であった。

本論文では、RGB 色空間上で色域を保証しつつ、色合いを変えることなく低照度／不鮮明な画像を効果的に強調する手法について述べる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、色空間とその色域について概説する。まず、色相、彩度、明度の三成分から構成される色空間について説明する。次に、RGB 色空間について述べる。ここで、本提案手法で用いる RGB 色空間における等色相平面についても説明する。

第 3 章では、低照度画像に対して色域を保証した色相保存型の画像強調手法について述べる。低照度画像を対象とした従来の強調法においては、色域問題の発生や色相が保存されないことによって、明るい領域で詳細部が消失することや不自然な色合いになるという問題が

あった。本論文では、これらの問題を解決する。提案手法では、白、黒、純色によって構成される RGB 色空間の等色相平面上で処理が実現される。入力画素は白、黒、純色の凸結合によって表され、その結合係数に対し、暗い画素のみを明るくする修正ガンマ変換が適用される。修正ガンマ変換では、暗い画素のみ明るくなるため、明るい領域の詳細部の消失が抑えられる。一方で、修正ガンマ変換は凸結合の係数の分布がシフトするだけであるため、コントラストが改善しない。この問題に対し、黒の係数のヒストグラムを平滑化することで、画像のコントラストを改善する。具体的には、ガンマ分布の関数に従うフィルタ係数を持つフィルタによって黒のヒストグラムを平滑化し、平滑化したヒストグラムを目標としたヒストグラム指定法によってコントラストを改善する。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、不鮮明な画像に対する RGB 色空間の等色相アンシャープマスキング法について述べる。不鮮明な画像の強調には、従来、アンシャープマスキングが用いられてきた。アンシャープマスキングは効果的に画像の詳細部を強調することができるが、RGB 各成分に処理を適用するため、入力画像の色相を保存できないという問題があった。本論文では色域を保証し、色相を保存した上で、アンシャープマスキングによる詳細部強調の効果を保持した手法について述べる。提案手法では RGB 各成分にアンシャープマスキングを適用し、これを RGB 色空間における等色相条件を満たす線形変換式で近似する。次に、RGB 色空間の色域から逸脱した画素を RGB 色空間における等色相平面に収める処理を行う。具体的には、色域から逸脱した画素と入力画素を結ぶ直線と RGB 色空間における等色相平面を構成する辺との交点に画素を修正する。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5章は結論である。本研究の成果を総括する。

本論文で使用する記号の一覧表

第 2 章から第 4 章まで共通して使用する記号の一覧表

I	入力カラー画像
(i, j)	画素の位置
$I(i, j)$	入力カラー画像の画素 (i, j) における画素値
$I^R(i, j)$	入力カラー画像の画素 (i, j) における R 成分値
$I^G(i, j)$	入力カラー画像の画素 (i, j) における G 成分値
$I^B(i, j)$	入力カラー画像の画素 (i, j) における B 成分値
$I'(i, j)$	$I(i, j)$ と同じ色相をもつ画素値
$A(i, j)$	$I(i, j)$ から $I'(i, j)$ へのスケーリングの定数
$B(i, j)$	$I(i, j)$ から $I'(i, j)$ へのシフティングの定数
e	全ての要素が 1 のベクトル (= $(1, 1, 1)$)
w	白色 (= $(1, 1, 1)$)
k	黒色 (= $(0, 0, 0)$)
$c(i, j)$	カラー画像の画素 (i, j) における純色
c	カラー画像の R, G, B 成分
$a_w(i, j)$	カラー画像の画素 (i, j) における白の係数
$a_k(i, j)$	カラー画像の画素 (i, j) における黒の係数
$a_c(i, j)$	カラー画像の画素 (i, j) における純色の係数
$O(i, j)$	出力カラー画像の画素 (i, j) における画素値

第 2 章で使用する記号の一覧表

$I_{sRGB}^c(i, j)$	ノンリニア RGB 値 $I^c(i, j)$ をリニア RGB 値へ変換した値
--------------------	--

$X(i, j)$	画素 (i, j) における X 成分値
$Y(i, j)$	画素 (i, j) における Y 成分値
$Z(i, j)$	画素 (i, j) における Z 成分値
X_n	標準光 D ₆₅ のときの X 成分値
Y_n	標準光 D ₆₅ のときの Y 成分値
Z_n	標準光 D ₆₅ のときの Z 成分値
$L^*(i, j)$	画素 (i, j) における L*成分値
$a^*(i, j)$	画素 (i, j) における a*成分値
$b^*(i, j)$	画素 (i, j) における b*成分値
$f(x)$	CIE-XYZ 色空間から CIE-L*a*b*色空間へ変換するための関数
$h(i, j)$	画素 (i, j) における CIE-L*a*b*色空間の色相
$C^*(i, j)$	画素 (i, j) における CIE-L*a*b*色空間の彩度
$H(i, j)$	画素 (i, j) における HSI 色空間や HSL 色空間の色相
$\theta(i, j)$	HSI 色空間における $H(i, j)$ を求めるための一時的な変数
$S(i, j)$	画素 (i, j) における HSI 色空間や HSL 色空間の彩度
$I(i, j)$	画素 (i, j) における HSI 色空間の明度
$H'(i, j)$	RGB 色空間へ逆変換する際の一時的な変数
$C_1(i, j)$	HSI 色空間から RGB 色空間へ逆変換する際の一時的な変数
$C_2(i, j)$	HSI 色空間から RGB 色空間へ逆変換する際の一時的な変数
$C_3(i, j)$	HSI 色空間から RGB 色空間へ逆変換する際の一時的な変数
$I_{max}(i, j)$	$I(i, j)$ の RGB 成分における最大値
$I_{min}(i, j)$	$I(i, j)$ の RGB 成分における最小値
$L(i, j)$	画素 (i, j) における HSL 色空間の明度
$M_1(i, j)$	HSL 色空間から RGB 色空間へ逆変換する際の一時的な変数
$M_2(i, j)$	HSL 色空間から RGB 色空間へ逆変換する際の一時的な変数
$T(i, j)$	HSL 色空間から RGB 色空間へ逆変換する際の一時的な変数
s	平面の媒介変数 (パラメータ)
t	平面の媒介変数 (パラメータ)

第3章で使用する記号の一覧表

$I_{\max}(i, j)$	k と $I(i, j)$ を結ぶ直線と w と $c(i, j)$ を結ぶ直線の交点
$P_{k,I}(i, j)$	k と $I(i, j)$ を結ぶ直線における任意の点
$s_{k,I}(i, j)$	点 $P_{k,I}(i, j)$ の位置を決める変数
$P_{w,c}(i, j)$	w と $c(i, j)$ を結ぶ直線における任意の点
$s_{w,c}(i, j)$	点 $P_{w,c}(i, j)$ の位置を決める変数
$\ I(i, j)\ _2$	$I(i, j)$ のユークリッドノルムの値
$\ I'(i, j)\ _2$	修正ガンマ変換後のユークリッドノルムの値
$\ I_{\max}(i, j)\ _2$	$I_{\max}(i, j)$ のユークリッドノルムの値
$\gamma(i, j)$	修正ガンマ変換の変換曲線を決めるための変数
α	修正ガンマ変換における出力の大きさを調節するための定数
β	$\gamma(i, j)$ における出力が1になるまでの範囲を調節するための定数
c'	カラー画像の R, G, B 成分
$I'(i, j)$	修正ガンマ変換後の画素値
$a'_w(i, j)$	修正ガンマ変換後の白の係数
$a'_k(i, j)$	修正ガンマ変換後の黒の係数
$a'_c(i, j)$	修正ガンマ変換後の純色の係数
$g_l(x)$	ガンマ分布の関数
m	ガンマ分布の関数の形状を調節するための定数
θ_l	ガンマ分布の関数の形状を調節するための定数
σ	ガンマ分布の関数の分布の広がりを調節するための定数
p_l	ガンマ分布の関数の極大値
h'_k	a'_k のヒストグラム
M	画像の縦の画素数
N	画像の横の画素数
$\delta(x/255, a'_k(i, j))$	クロネッカーのデルタ
y	次元のフィルタのための定数
z	次元のフィルタのフィルタサイズを決める定数

$G_{1D,l}(x)$	ガンマ分布の関数を正規化した値
$h_{k',\sigma_{g_l}}$	$h_{k'}$ をガンマ分布の関数に従うフィルタによって平滑化したヒストグラム
$p_{k'}$	$h_{k'}$ の正規化ヒストグラム
$p_{k',\sigma_{g_l}}$	$h_{k',\sigma_{g_l}}$ の正規化ヒストグラム
$P_{k'}(x)$	$h_{k'}$ の正規化累積ヒストグラム
$P_{k',\sigma_{g_l}}(x)$	$h_{k',\sigma_{g_l}}$ の正規化累積ヒストグラム
$a''_k(i, j)$	ヒストグラム指定法によって変換された黒の係数
$a''_w(i, j)$	$a'_w(i, j)$, $a''_k(i, j)$, $a'_c(i, j)$ で白の係数を正規化した値
$a'''_k(i, j)$	$a'_w(i, j)$, $a''_k(i, j)$, $a'_c(i, j)$ で黒の係数を正規化した値
$a''_c(i, j)$	$a'_w(i, j)$, $a''_k(i, j)$, $a'_c(i, j)$ で純色の係数を正規化した値
LOE	入力画像と出力画像の明度の序列関係を計算した値
p	LOE を計算するときの一時的な変数
q	LOE を計算するときの一時的な変数
$U(p, q)$	p が q 以上ならば 1, それ以外を 0 とする変数
$V_I(i, j)$	$I(i, j)$ の RGB 成分の最大値
$V_O(i, j)$	$O(i, j)$ の RGB 成分の最大値
HD _{Raines}	Raines の色相による色相差
i'	虚数単位
$H_I(i, j)$	$I(i, j)$ の色相
$H_O(i, j)$	$O(i, j)$ の色相
HD _{Lab}	CIE1976L*a*b*色空間における色相差
$\Delta E(i, j)$	CIE1976L*a*b*色空間における色差
$L_I(i, j)$	$I(i, j)$ の L 成分
$a_I(i, j)$	$I(i, j)$ の a 成分
$b_I(i, j)$	$I(i, j)$ の b 成分
$L_O(i, j)$	$O(i, j)$ の L 成分
$a_O(i, j)$	$O(i, j)$ の a 成分
$b_O(i, j)$	$O(i, j)$ の b 成分

$\Delta L(i, j)$	$L_I(i, j)$ と $L_O(i, j)$ の差
$\Delta a(i, j)$	$a_I(i, j)$ と $a_O(i, j)$ の差
$\Delta b(i, j)$	$b_I(i, j)$ と $b_O(i, j)$ の差
$\Delta C(i, j)$	CIE1976L*a*b*色空間における彩度差
CR	白つぶれ, 黒つぶれの画素について評価する指標
n_s	処理結果後の画素が黒もしくは白になった画素の数
GRVE	入力と出力画像のエッジを用いて画像の視認性を評価する指標
Q	近傍画素の座標の集合
N_Q	Q の要素数
$dV_O(i, j)$	$V_O(i, j)$ に対し水平および垂直方向の 微分フィルタを適用することによって得られた勾配値
$dV_I(i, j)$	$V_I(i, j)$ に対し水平および垂直方向の 微分フィルタを適用することによって得られた勾配値
$C(i, j, s)$	局所コントラストの値
p_t	局所コントラストの判定に関する定数
r_ϕ	GRVEにおける近傍画素を参照する範囲を決めるための定数
g_v	垂直方向の微分フィルタカーネル
g_h	水平方向の微分フィルタカーネル

第4章で使用する記号の一覧表

$I'^c(i, j)$	提案手法における Naik と Murthy の色相保存の条件式で近似する画素値
$G_u^c(i, j)$	$I^c(i, j)$, $c \in \{R, G, B\}$ をガウシアンフィルタで平滑化したときの画素値
r_u	アンシャープマスキングにおける近傍画素の範囲を決めるための定数
$G_{2D}(k, l)$	二次元のガウシアンカーネル
σ_u	二次元のガウシアンカーネルの標準偏差
k'	カーネル係数を正規化するための定数
l'	カーネル係数を正規化するための定数
α_u	画像の詳細部強調を調節するための定数

$E(i, j)$	$I^c(i, j)$ を Naik と Murthy の色相保存の条件式で近似するためのコスト関数
$s_{I, I'}(i, j)$	$I(i, j)$ と $I'(i, j)$ の RGB 成分の共分散
$\sigma_I(i, j)$	$I(i, j)$ の RGB 成分の分散
$\bar{I}(i, j)$	$I(i, j)$ の RGB 成分の平均値
$\bar{I}'(i, j)$	$I'(i, j)$ の RGB 成分の平均値
$\overline{kc}(i, j)$	k と $c(i, j)$ を結ぶ直線
$\overline{I(i, j)O(i, j)}$	$I(i, j)$ と $O(i, j)$ を結ぶ直線
$P_{k,c}(i, j)$	$\overline{kc}(i, j)$ 上にある任意の点
$s_{k,c}(i, j)$	点 $P_{k,c}(i, j)$ の位置を決める変数
$P_{I,O}(i, j)$	$\overline{I(i, j)O(i, j)}$ 上にある任意の点
$s_{I,O}(i, j)$	点 $P_{I,O}(i, j)$ の位置を決める変数
$d_1(i, j)$	交点を計算するための一時的な変数
$d_2(i, j)$	交点を計算するための一時的な変数
$\overline{wc}(i, j)$	w と $c(i, j)$ を結ぶ直線
$P_{w,c}(i, j)$	$\overline{w(i, j)c(i, j)}$ 上にある任意の点
$s_{w,c}(i, j)$	点 $P_{w,c}(i, j)$ の位置を決める変数
α_u^R	画像の R 成分の詳細部強調を調節するための定数
α_u^G	画像の G 成分の詳細部強調を調節するための定数
α_u^B	画像の B 成分の詳細部強調を調節するための定数

目次

論文要旨	i
本論文で使用する記号の一覧表	iii
第2章から第4章まで共通して使用する記号の一覧表	iii
第2章で使用する記号の一覧表	iii
第3章で使用する記号の一覧表	v
第4章で使用する記号の一覧表	vii
第1章 序論	1
第2章 色空間とその色域	6
2.1 緒言	6
2.2 カラー画像の強調処理	6
2.3 RGB色空間	9
2.4 結言	17
付録2.A CIE-1976L*a*b*	18
付録2.B HSI色空間	20
付録2.C HSL色空間	21
付録2.D 平面のパラメータ表示	22
付録2.E NaikとMurthyの色相保存の条件式とHSI色空間, HSL色空間の色相	23
第3章 低照度画像に対するRGB色空間の等色相平面における画像強調法	26
3.1 緒言	26
3.2 低照度画像	26
3.3 低照度画像に対するRGB色空間の等色相平面における画像強調	27
3.4 比較実験	37
3.4.1 実験準備	37

3.4.2	主観評価	37
3.4.3	定量評価	37
3.5	結言	44
第 4 章	不鮮明な画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調法	46
4.1	緒言	46
4.2	不鮮明度画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調手法 . . .	46
4.3	比較実験	51
4.3.1	実験準備	51
4.3.2	主観評価	51
4.3.3	定量評価	52
4.3.4	I^c の変化による処理結果の変化	53
4.3.5	α の変化による処理結果の変化	56
4.4	結言	61
付録 4.A	式 (4.7), (4.8) の導出	61
付録 4.B	共面条件	64
付録 4.C	式 (4.17), (4.18) の導出	64
第 5 章	結論	66
	謝辞	68
	参考文献	69

第1章 序論

本論文は、RGB 色空間の色域を保証しつつ、画像の色合いを変えずに低照度／不鮮明なカラー画像を強調する手法について述べたものである。まず、色空間とその色域について述べる。次に、低照度画像を対象とした従来の画像強調法における問題点、および RGB 色空間の色域を保証しつつ、色相保存型の低照度画像の強調法について述べる。その後、RGB 色空間の色域の保証および色相を保存しつつ、画像の詳細部強調を維持する手法について述べる。

デジタルカメラは、人物や風景の撮影の他に、部品の組み立てや製品検査、防犯、医療支援など多岐にわたって利用されている。特に最近では、スマートフォンやタブレットといった小型端末にもデジタルカメラが搭載されており、様々な場所で自由に写真を撮影することが可能になっている。しかし、撮影環境によっては視認性の悪い、低品質なカラー画像が得られることがある。そのような画像を高品質なカラー画像にするために、コントラスト強調法や詳細部強調法など、画質向上に関する様々な手法の開発が行われている¹⁻⁶。

カラー画像では色によって情報が表現される。色は、「色相」「彩度」「明度」の三つの属性から構成される。色相は色味の性質、彩度は鮮やかさ、明度は明るさを表す。これらの色の三属性は多くの人にとって理解しやすい色の物差しである。一方、工学的な面では、加法混色の三原色である赤、緑、青を三属性とした RGB 色空間が広く使用され、一般にデジタルカメラ等のカラー画像取得系も RGB 色空間で行われる。しかし、RGB 成分の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⁷⁻¹³。例えば、もっと鮮やかにしたい場合、RGB 色空間の三成分のうち、どの成分をどれだけ変化させたら良いか、感覚的にはわからない。そのため、HSI 色空間や HSL 色空間などの色相、彩度、明度の三成分から構成される色空間に画素値を変換してから、画像処理を行うことが多い¹⁴⁻²²。これらの手法では、RGB 色空間で表現されている色を HSI 色空間や HSL 色空間などに変換し、その色相、彩度、明度いずれかを変更し、再び RGB 色空間に変換する。このとき、変換後の色が RGB 色空間の表示可能領域(色域)を超えた値になる場合がある。この場合、RGB 色空間の色域から逸脱した画素を画素値の範囲にクリッピングすることが行われているが、このような処理は意図せず色

相や彩度，明度が変化するという問題がある。

色域の問題を改善するために様々な研究が行われているが²³⁻³⁰，RGB色空間のみで処理を完結させることができれば，色空間変換によって生じる不都合を解消することができる。NaikとMurthyはRGB色空間における色相保存の条件式を用いることで，RGB色空間の色域を保証しつつ，色相を保ちながら画像を強調する手法を提案している³¹。しかし，NaikとMurthyの画像強調手法では彩度が低下するという問題があった。そのため，彩度低下を引き起こさない画像強調手法が提案されている³²⁻³⁶。とりわけ，植田らの手法^{35,36}はRGB色空間において明度コントラストおよび彩度を同時に強調することができる。植田らの手法は適度な光量の下で撮影された画像に対しては効果的な強調結果を得ることができる。しかし，暗い環境下で撮影された低照度画像に対しては，あまり視認性が改善されず強調効果が限定的であった。

このような問題を解決するために，近年，低照度画像を対象とした画像強調手法が提案されている。低照度画像を明暗反転させると，霧がかかったような画像になることに着想を得て，ヘイズ除去法³⁷を用いた低照度画像の強調法³⁸⁻⁴⁰が提案されている。これらの手法は画像を明るくすることができるが，過強調な結果になるという問題がある。X. GuoらはRetinex理論⁴¹に基づく低照度画像の強調法を提案している⁴²。Retinex理論においては画像は照明光と反射率の積で表されると仮定する。X. Guoらの手法では入力画像から照明光を推定し，推定された照明光で入力画像を除算することによって照明光の影響を受けていない反射率を求める。この求めた反射率を最終的な出力画像とする。X. Guoらの手法は画像全体を明るくすることができるが，暗い領域のコントラストを大幅に改善することができる。しかし，明るい領域での詳細部の消失や暗い領域でのノイズ増幅といった問題がある。Liらはノイズの増幅を抑制することを取り入れたRetinex理論に基づく低照度画像の強調法を提案している⁴³。Liらの手法はノイズの増幅を軽減することができるが，出力画像のコントラストが低いという問題がある。最近では，深層学習に基づく低照度画像の強調法も提案されている。低照度画像とその理想的な強調画像を用意し，理想的な強調画像となるように学習するネットワーク^{44,45}や，Retinex理論に基づく低照度画像の強調法のように照明光を推定するネットワーク⁴⁶が提案されている。しかし，これらの手法はいずれも入力画像とその理想的な強調画像を必要とする。Jiangらは理想的な強調画像を必要としない深層学習に基づく低照度画像の強調法を提案している⁴⁷。Jiangらの手法を用いると，画像のコントラストを大幅に改善することができる。しかし，多くの場合，出力画像が不自然な色合いになるという問題がある。C. Guoらは画素ごとに出力の濃淡値を調節するためのトーンカーブを学習するネットワークを提案

表 1.1: 低照度画像に対する従来の画像強調法および本論文の第3章における手法の特徴.

Table 1.1: Features of conventional image enhancement methods for low-light image and a method proposed in Chapter 3 of this thesis.

	色相保存	適度なコントラスト 強調	詳細部の 保存	アーティファクトの 抑制
X. Guo らの手法 ⁴²	×	×	×	×
Li らの手法 ⁴³	×	×	×	×
Jiang らの手法 ⁴⁷	×	○	○	×
C. Guo らの手法 ⁴⁸	×	×	○	×
第3章の手法	○	○	○	○

している⁴⁸. C. Guo らの手法も理想的な強調画像を必要としない深層学習に基づく低照度画像の強調法である. しかし, 出力画像のコントラストが低いという問題がある. また, 低照度画像を対象とした従来の画像強調手法においては, 入力画像の色相が保存されない, アーティファクトが生じるという問題がある. 以上より, 低照度画像に対する従来の画像強調法の特徴は表 1.1 のように整理できる. 本論文の第3章の手法では従来の画像強調法における問題点を改善する.

不鮮明な画像に対する従来の画像強調法としては, アンシャープマスキングがある. アンシャープマスキングでは入力画像をガウシアンフィルタ等⁴⁹⁻⁵¹で平滑化し, 入力画像と平滑化後画像との差を取り, 入力画像の詳細成分を求める. そして, その詳細成分を入力画像に加算することで画像が鮮鋭化され, 鮮明な画像となる. 一般に, カラー画像に対しては RGB 各成分にアンシャープマスキングを適用する. また, 他のアンシャープマスキングとして, L_0 ノルムの最適化⁵²⁻⁵⁴を用いる手法が提案されている⁵⁵. この手法もカラー画像に対しては, RGB 各成分に処理が適用される. これらの手法は画像の詳細部を効果的に強調することができるが, 出力画像の色相が入力画像の色相から変化するという問題がある. Yu と Urahama は入力画像の色相を保存しつつ画像を鮮鋭化する手法を提案している⁵⁶. Yu と Urahama の手法では入力画像の明度成分を平滑化し, 入力画像の RGB 各成分を平滑化後の明度画像で差を取ることで入力画像の詳細成分を求める. Yu と Urahama の手法の出力画像はコントラストや彩度が強調されるが, 画像の鮮鋭化の効果が弱いという問題がある. 最近では学習ベースのアンシャープマスキング法も提案されている. Xie らは辞書学習^{57,58}を用いたアンシャープマスキング法を提案している⁵⁹. Xie らの手法は画像の鮮鋭化によるアーティ

表 1.2: 不鮮明な画像に対する従来の画像強調法および本論文の第4章における手法の特徴.

Table 1.2: Features of conventional image enhancement methods for unclear image and a method proposed in Chapter 4 of this thesis.

	色相保存	画像の鮮鋭化の効果
一般的なアンシャープマスキング法	×	○
Kou らの手法 ⁵⁵	×	○
Xie らの手法 ⁵⁹	×	×
Yu と Urahama の手法 ⁵⁶	○	×
第4章の手法	○	○

ファクトやハローを抑えることができるが、鮮鋭化の効果が弱いという問題がある。Son らは Generative Adversarial Network (GAN)^{60,61} によって画像の詳細成分を強調する手法を提案している⁶²。この手法はコントラストや画像の鮮鋭成分を効果的に強調することができるが、不自然な色やアーティファクトが発生するという問題がある。以上より、不鮮明な画像に対する従来の画像強調法の特徴は表 1.2 のように整理できる。本論文の第4章の手法では従来の画像強調法における問題点を改善する。

本論文では、RGB 色空間上で色域を保証しつつ、色合いを変えることなく低照度／不鮮明な画像を効果的に強調する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、色空間とその色域について概説する。まず、色相、彩度、明度の三成分から構成される色空間について説明する。次に、RGB 色空間について述べる。ここで、本提案手法で用いる RGB 色空間の等色相平面についても説明する。

第3章では、低照度画像に対する RGB 色空間の色域の保証かつ色相保存型の画像強調手法について述べる。提案手法では、白、黒、純色によって構成される RGB 色空間の等色相平面上で処理が実現される。入力画素は白、黒、純色の凸結合によって表され、その結合係数に対し、暗い画素のみを明るくする修正ガンマ変換が適用される。修正ガンマ変換では、暗い画素のみ明るくなるため、明るい領域の詳細部の消失が抑えられる。一方で、修正ガンマ変換は凸結合の係数の分布がシフトするだけであるため、コントラストが改善しない。この問題に対し、黒の係数のヒストグラムを平滑化することで、画像のコントラストを改善する。具体的には、ガンマ分布の関数に従うフィルタ係数を持つフィルタによって黒のヒストグラ

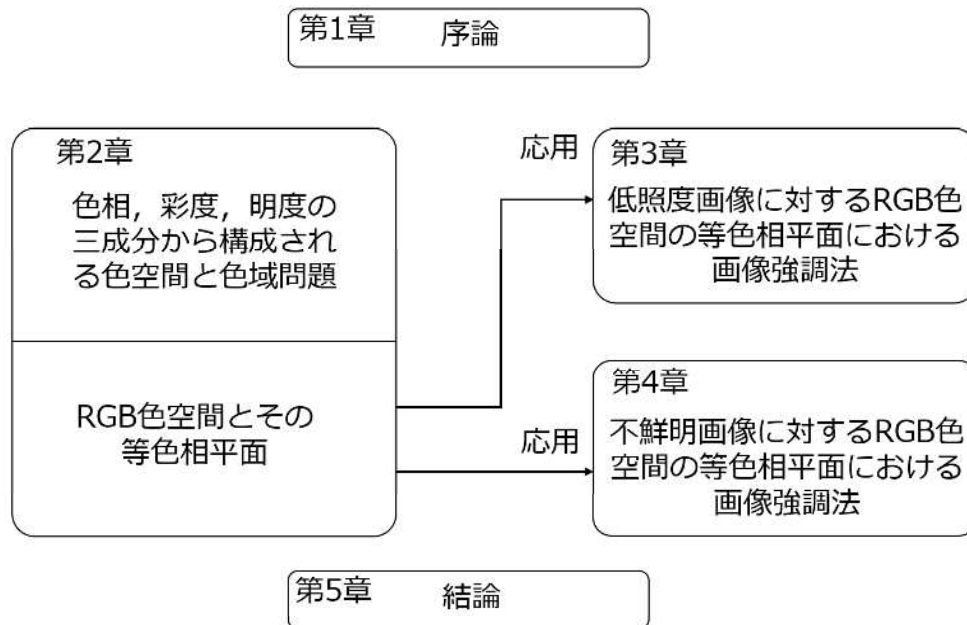


図 1.1: 本論文の構成.

Fig. 1.1: Framework of the thesis.

ムを平滑化し, 平滑化したヒストグラムを目標としたヒストグラム指定法によってコントラストを改善する. 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, 不鮮明な画像に対するRGB色空間の等色相アンシャープマスキング法について述べる. 色域を保証し, 色相を保存した上でアンシャープマスキングによる詳細部強調の効果を保持した手法について述べる. 提案手法ではRGB各成分にアンシャープマスキングを適用し, これをRGB色空間における等色相条件を満たす線形変換式で近似する. 次に, RGB色空間の色域から逸脱した画素をRGB色空間の等色相平面に収める処理を行う. 具体的には, 色域から逸脱した画素と入力画素を結ぶ直線とRGB色空間の等色相平面を構成する辺との交点に画素を修正する. 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5章は結論である. 本研究の成果を総括する.

第2章 色空間とその色域

2.1 緒言

本章では、カラー画像の強調処理、および色空間とその色域について概説する。また、第3章、第4章で提案する手法で用いる RGB 色空間上の等色相平面についても説明する。2.2 節では、色空間変換を伴うカラー画像の強調処理について説明し、問題点について述べる。2.3 節では、RGB 色空間について述べる。

2.2 カラー画像の強調処理

人間の眼は約 400nm から 800nm の範囲内の電磁波を検出すると、その波長に応じた色の光として知覚する¹³。その一方で、お互いに独立した三つの色の光を混ぜることで、任意の色を再現できる加法混色がある。加法混色では、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の三つの色の光を用いる。国際照明委員会 (CIE) は波長 700nm(R)、546.1nm(G)、435.8nm(B) の三種類の光を原刺激とした CIE-RGB 表色系を提案している⁶³。しかし、CIE-RGB 表色系では負の値が生じることや、測光量との対応が複雑といった実用上の問題がある。そのため、これらの問題を改善した原刺激 X、Y、Z からなる CIE-XYZ 表色系が定義されている⁶⁴。しかし、CIE-XYZ 表色系で規定される色空間内における 2 点間のユークリッド距離は色差感覚に対応していない。ある二つの色の座標間のユークリッド距離が同じでも、色空間内の位置によって異なった色差になる。つまり、CIE-XYZ 表色系では色空間の均等性が保証されていない。そのため、色空間上の 2 点間のユークリッド距離が均等になるように定められた CIE-1976L*a*b*色空間が提案されている⁶⁵。

CIE-RGB 表色系や CIE-XYZ 表色系、そして CIE-1976L*a*b*色空間は、液晶ディスプレイやプラズマディスプレイといったデバイスの特性に依存しないため、デバイス独立色空間と呼ばれる。デバイス独立色空間に対し、デバイスに依存した色空間をデバイス依存色空間と呼ぶ。デバイス依存色空間としてよく用いられている色空間は RGB 色空間である。基本的に色情報の交換はデバイス独立色空間で行い、色の入出力はデバイス依存色空間で行う。図 2.1 は

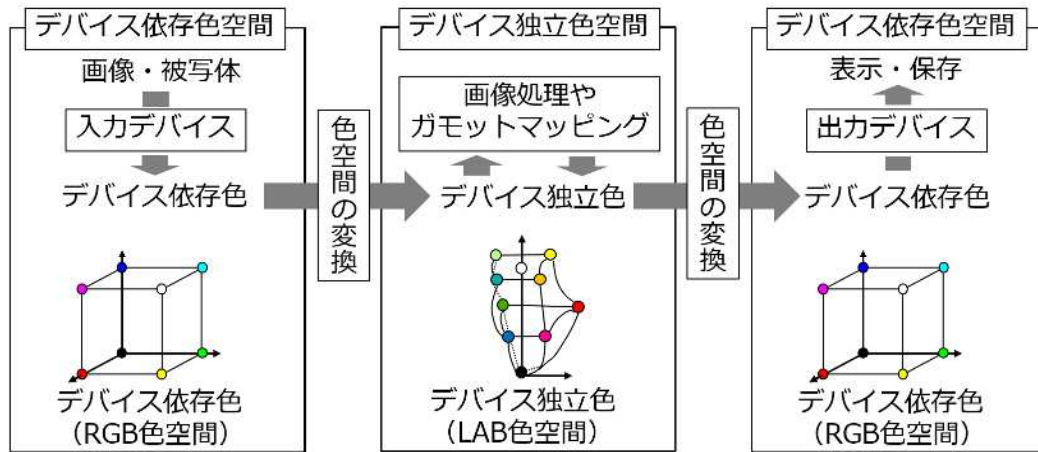


図 2.1: 色空間変換を伴うカラー画像の強調処理の流れ。

Fig. 2.1: Flow of color image enhancement with color space conversion.

色空間変換を伴うカラー画像の強調処理フローの例である。デジタルカメラによる入力機器やディスプレイによる出力機器におけるカラー画像取得系は、CIE-RGB 表色系の原刺激値とは異なりデバイス依存色空間、すなわち RGB 色空間である。図 2.1 に示すように、カラー画像の強調を行う際はまずデバイス依存色空間からデバイス独立色空間に変換し、その色空間において強調処理を行う。最終的には、処理結果をデバイス依存色空間に再変換することで出力画像を得る。RGB 色空間から CIE-1976L*a*b*色空間への変換式、および CIE-1976L*a*b*色空間から RGB 色空間への変換式は付録 2.A に記す。

しかし、色空間変換を伴うカラー画像の強調には色域の問題がある。ここで色域は、デバイス依存色空間上で表示可能な値の範囲のことを指す。CIE-1976L*a*b*色空間は色差を均等にしよう定義されているため、複雑な形状を持つ色空間になっている。図 2.2 に明度 L が 50 のときの CIE-1976L*a*b*色空間色空間の断面図を示す。 $(a^*, b^*) = (0, 0)$ を原点とし、原点からのユークリッド距離を計算した値が彩度である(付録 2.A の式 (2.A.8))。図 2.2 に示す形状からわかるように、色ごとに最大の彩度の大きさが異なる。彩度を強調する処理を行った際に、最大彩度を越えた彩度に変換されることがある。さらに、CIE-1976L*a*b*色空間の色域とデバイスに依存した色空間の色域は一致していない。そのため、デバイス依存色空間に戻した際に、デバイス依存色空間の表示範囲を超えてしまい、意図しない色が出力されることがある。

また、RGB 色空間においては、画像編集ソフトウェアやアプリケーション等で画像を編集する場合、R, G, B 成分の画素値を直接指定する方法がある。しかし、R, G, B 成分の画素

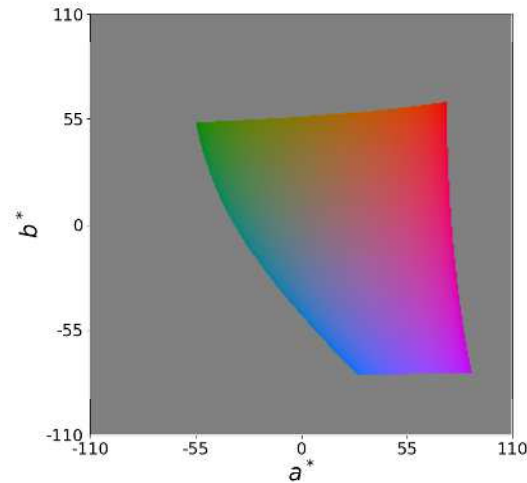


図 2.2: CIE-1976L*a*b*色空間の断面図 ($L = 50$).

Fig. 2.2: Cross-section of CIE-1976 L*a*b* color space ($L = 50$).

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。多くの人にとって、色相 (Hue: H), 彩度 (Saturation: S), 明度 (Intensity: I, Lightness: L など) の三成分を扱う方が容易である。ここで、明度においては様々な定義が存在し、その定義に応じて HSI 色空間や HSL 色空間など様々な色空間が定義されている。これらの色空間はデザイン業界やインテリア業界などで広く使われており、マンセル表色系と呼ばれる。デジタル画像処理においては、HSI 色空間などへ変換を行い、その色相、彩度、明度いずれかを変更し、再び RGB 色空間へと変換する。とりわけ、画像強調においては彩度や明度に強調処理を適用し、色相は変化させないことが一般的である^{14,15,17,19-22}。HSI 色空間, HSL 色空間への変換においてはそれぞれ円柱モデル⁷, 双六角錐モデル⁶⁶が提案されている。RGB 色空間から各色空間への変換や逆変換については、付録 2.B, 2.C に記す。図 2.3 に HSI 色空間の模式図を示す。色相 H の値の範囲は $[0^\circ, 360^\circ)$, 彩度 S の値の範囲は $[0, 1]$, 明度 I の値の範囲は $[0, 1]$ である。HSI 色空間においてはこれらの値の範囲内であっても、RGB 色空間の色域を超えることがある。図 2.4 に $H = 0^\circ, S = 1, I = 1$ のときの HSI 色空間と RGB 色空間を示す。 $H = 0^\circ, S = 1, I = 1$ のときの RGB の値は $(R,G,B) = (3,0,0)$ である。一方、RGB 色空間の色域は R, G, B それぞれで 0 から 1 までの範囲となっており、図 2.4 に示すように立方体である。つまり、 $H = 0^\circ, S = 1, I = 1$ のときの RGB の値は、RGB 色空間の色域を超えている。また、図 2.5, 2.6 はそれぞれ色相 H を $30^\circ, 60^\circ$ としたときの HSI 色空間と RGB 色空間である。図 2.5 に示すように $H = 30^\circ, S = 1, I = 1$ のときの RGB の値は $(R,G,B) = (2, 1, 0)$

であり, RGB 色空間の色域を超えている. 図 2.6 に示すように $H = 60^\circ$, $S = 1$, $I = 1$ のときの RGB の値は $(R,G,B) = (1.5, 1.5, 0)$ であり, RGB 色空間の色域を超えている. $S = 1$, $I = 1$ と固定し, H を 0° から 360° まで変化させたとき, RGB 色空間においては図 2.7 のように表される. 図 2.7 の $(3, 0, 0)$, $(0, 3, 0)$, $(0, 0, 3)$ を結ぶ三角形が $S = 1$, $I = 1$ と固定し, H を 0° から 360° まで変化させたときに得られた RGB 値である. また, $(0, 0, 0)$, $(3, 0, 0)$, $(0, 3, 0)$, $(0, 0, 3)$ を結ぶ三角錐が RGB 色空間上で色相, 彩度, 明度の三成分で構成される色空間 (HSI 色空間) の色域を表している. これは, 明らかに RGB 色空間の色域よりも広い. また, 図 2.7 に示す色空間において $H = 0^\circ$ である平面は, 図 2.8(a) の水色の枠で囲った三角形である. その三角形を切り出すと, 図 2.8(b) のような図になる. 図 2.8(b) の点線で囲まれた直角三角形の領域が RGB 色空間における HSI 色空間の色域, 灰色の三角形の領域が RGB 色空間の色域である. RGB 色空間上で表された HSI 色空間の色域は三角錐であるから, ある等色相の平面における HSI 色空間の色域は直角三角形になる. 図 2.8(b) に示すように $H = 0^\circ$ においては, HSI 色空間の I が $1/3$ を超えると, RGB 色空間の色域から外れることがある. また, 図 2.9, 2.10 に色相 H を 30° , 60° としたときの平面を示す. H が変わることによって, 三角形の形状が変わる. 図 2.9(b) や図 2.10(b) に示すように $H = 30^\circ$ においては, HSI 色空間の I が $1/2$ を超えると, $H = 60^\circ$ においては, I が $2/3$ を超えると, RGB 色空間の色域から外れることがある.

RGB 色空間の色域は HSI 色空間の色域よりも小さい. そのため, HSI 色空間などで彩度や明度に強調処理を適用した後に RGB 色空間へ変換すると, RGB 色空間の色域から逸脱する「色域問題」が生じる. この色域問題に対し, 画素値の範囲にクリッピングしたり, 正規化処理が行われているが, 意図しない色として出力される恐れがある^{56,67,68}. RGB 色空間の色域から逸脱した画素に対し, 画素値の範囲にクリッピングした場合の例を図 2.11 に示す. 図 2.11 に示すように画素値の範囲にクリッピングをすると, 色相や彩度, 明度までもが変化してしまう. 意図しない色に変換しないために, 新たな変換則が提案されている^{27,30}. しかし, これらの変換則は色域判定処理が複雑であるという問題がある.

2.3 RGB 色空間

前節で述べた問題を避けるため, RGB 色空間で画像強調を行う研究が行われている³¹⁻³⁶. カラー画像 I の画素 (i, j) に位置する画素値は以下のように表すことができる.

$$I(i, j) = (I^R(i, j), I^G(i, j), I^B(i, j)). \quad (2.1)$$

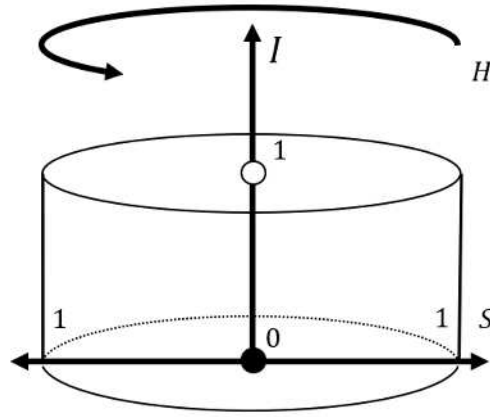


図 2.3: HSI 色空間.

Fig. 2.3: HSI color space.

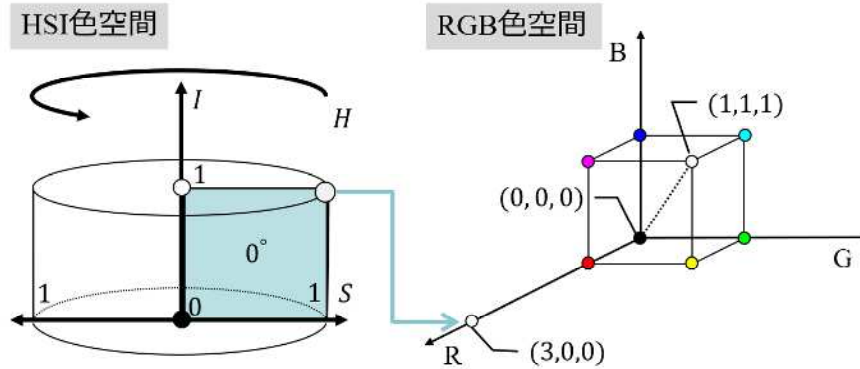


図 2.4: $H = 0^\circ$, $S = 1$, $I = 1$ のときの HSI 色空間と RGB 色空間.

Fig. 2.4: HSI color space and RGB color space when $H = 0^\circ$, $S = 1$ and $I = 1$.

$I^R(i, j)$, $I^G(i, j)$, $I^B(i, j)$ はそれぞれ RGB 色空間における R, G, B 成分の値である. カラー画像における各値の実際の範囲は $[0, 255]$ である. 本論文では, 計算のために各値を正規化し, $0 \leq I^R(i, j) \leq 1$, $0 \leq I^G(i, j) \leq 1$, $0 \leq I^B(i, j) \leq 1$ とする. 図 2.12 に RGB 色空間の概念図を示す. 図 2.12 に示すように, RGB 色空間の色域は立方体である. また, $(0, 0, 0)$ の黒と $(1, 1, 1)$ の白を結ぶ対角線上の色はすべて無彩色である.

Naik と Murthy は RGB 色空間における色相保存の変換式を以下のように定義している³¹.

$$I'(i, j) = A(i, j)I(i, j) + B(i, j)e. \tag{2.2}$$

ここで, $I'(i, j)$ は $I(i, j)$ と同じ色相を持つ変換後の画素値である. $A(i, j)$ と $B(i, j)$ はそれぞれ

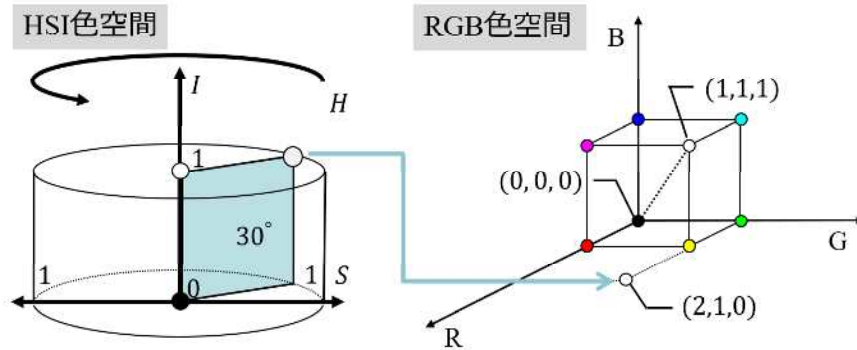


図 2.5: $H = 30^\circ$, $S = 1$, $I = 1$ のときの HSI 色空間と RGB 色空間.

Fig. 2.5: HSI color space and RGB color space when $H = 30^\circ$, $S = 1$ and $I = 1$.

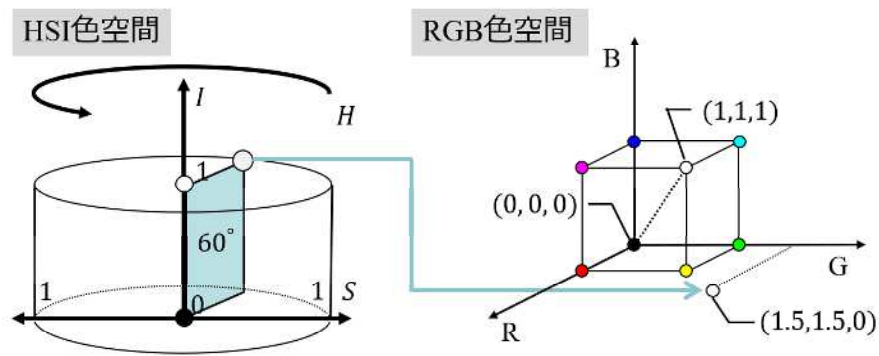


図 2.6: $H = 60^\circ$, $S = 1$, $I = 1$ のときの HSI 色空間と RGB 色空間.

Fig. 2.6: HSI color space and RGB color space when $H = 60^\circ$, $S = 1$ and $I = 1$.

れ $I(i, j)$ から $I'(i, j)$ へのスケーリングとシフティングのパラメータであり, $A(i, j) \geq 0$ である. また, $e = (1, 1, 1)$ である. 式 (2.2) において, $A(i, j)$ と $B(i, j)$ を媒介変数 (パラメータ) と考えると, 式 (2.2) は $(0, 0, 0)$, $(1, 1, 1)$, $(I^R(i, j), I^G(i, j), I^B(i, j))$ の 3 点を通る平面のパラメータ表示である (付録 2.D 参照). つまり, RGB 色空間において等しい色相を持つ画素の集合は一つの平面上に存在する. また, 式 (2.2) で得られる値について HSI 色空間や HSL 色空間で定義される色相を計算すると, その値は入力画素で計算した色相と同じになる. つまり, $I'(i, j)$ の色相は $I(i, j)$ の色相を保っていることを表している. 式 (2.2) を HSI 色空間や HSL 色空間で定義される色相に代入した計算については, 付録 2.E に記す.

また, 玉垣らは白, 黒, 純色で囲まれる三角形の領域が RGB 色空間における等色相平面であると定義している⁶⁹. ここで, 白は $w = (1, 1, 1)$, 黒は $k = (0, 0, 0)$, 純色は $I(i, j)$ と同じ色相を持ち, かつ最も鮮やかな画素である. ここで, 純色は最大値が 1, 最小値が 0 の 3 次元

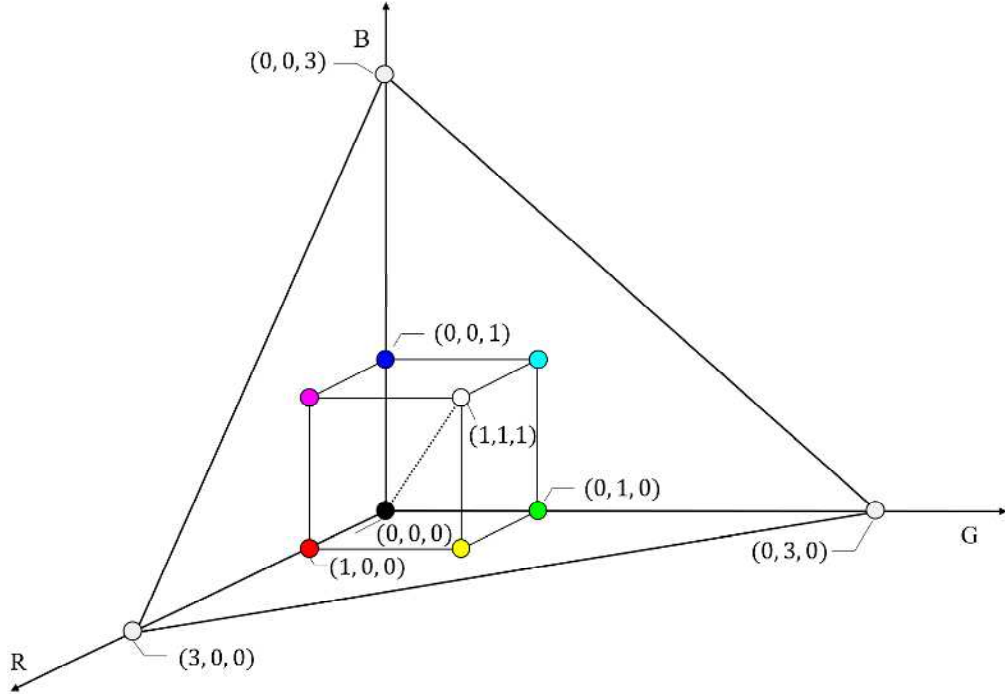


図 2.7: RGB 色空間の色域と RGB 色空間における色相, 彩度, 明度の三成分で構成される色空間の色域.

Fig. 2.7: Gamut of RGB color space and gamut of color space consisting of hue, saturation, and intensity in RGB color space.

ベクトルであり, 以下によって求めることができる.

$$c(i, j) = \frac{\mathbf{I}(i, j) - \min_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j)) \mathbf{e}}{\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) - \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j)}. \quad (2.3)$$

ここで, $\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j)$ と $\min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j)$ はそれぞれ $\mathbf{I}(i, j)$ における RGB 成分の最大値と最小値である. また, $1/(\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) - \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j)) = A(i, j)$, $-\min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j)/(\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) - \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j)) = B(i, j)$ とすると, 式 (2.3) と式 (2.2) は同じ式である. つまり, $c(i, j)$ は $\mathbf{I}(i, j)$ と同じ色相を持つ. ただし, $I^R(i, j) = I^G(i, j) = I^B(i, j)$ の場合, $\mathbf{I}(i, j)$ は無彩色であり, 色相を持たない. また, 式 (2.3) より純色を計算することができない. そのため, 色相を持たない画素については $c(i, j) = (0, 0, 0)$ とする. 図 2.13 に RGB 色空間における等色相平面を示す. $\mathbf{I}(i, j)$ は白 \mathbf{w} , 黒 \mathbf{k} , 純色 $c(i, j)$ で囲まれた三角形の領域に存在する. ここで, RGB 色空間の等色相平面において, 式 (2.2) の $A(i, j)$ と $B(i, j)$ を変化させたときの画素の動きを図 2.14 に示す. $A(i, j)$ は黒 \mathbf{k} と入力画素 $\mathbf{I}(i, j)$ を結ぶ直線上で画素が動く. $B(i, j)$ は黒 \mathbf{k} と白 \mathbf{w} を結ぶ直線に平行して画素が動く.

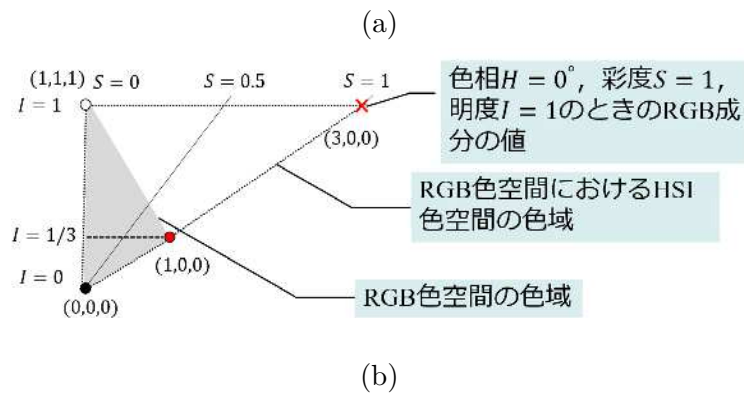
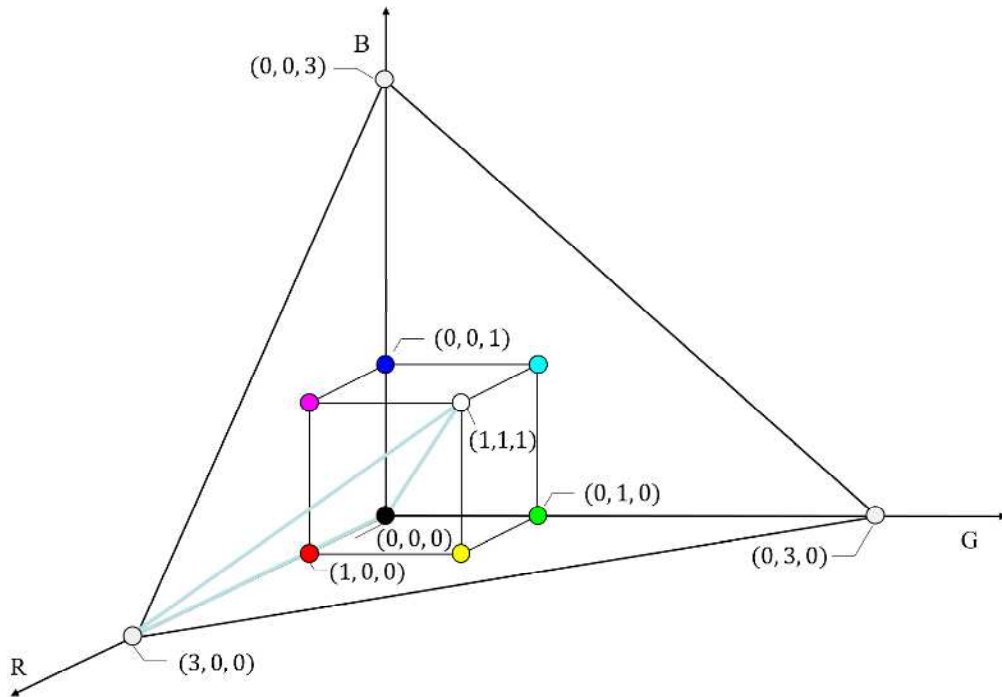


図 2.8: 図 2.7 における $H = 0^\circ$ の平面. (a) 図 2.7 における $H = 0^\circ$ の平面, (b) $H = 0^\circ$ の平面.

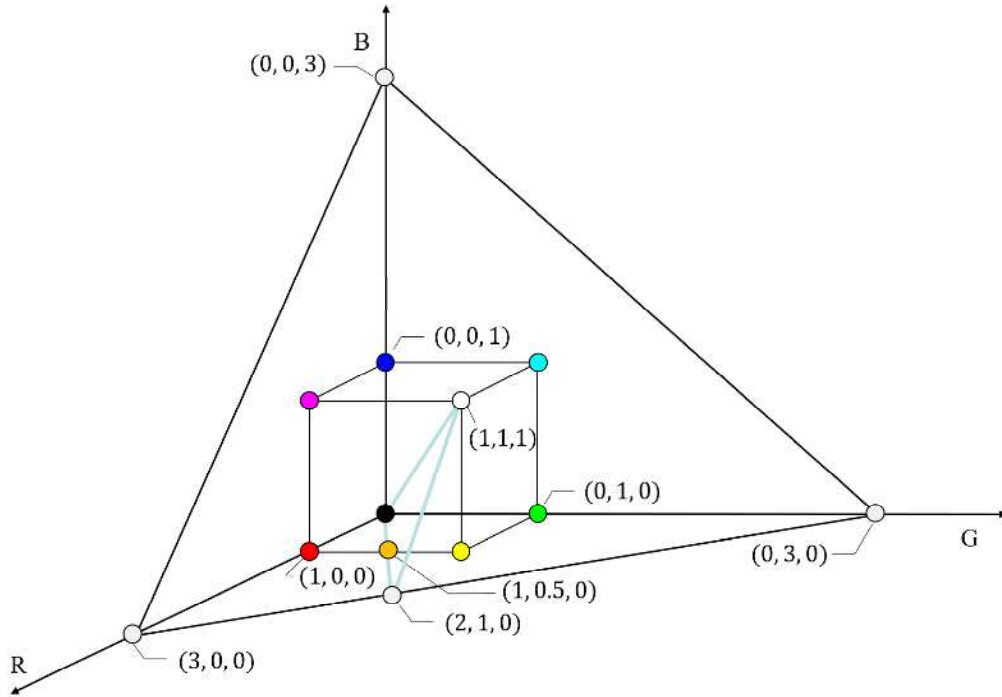
Fig. 2.8: A plane of $H = 0^\circ$ in Fig. 2.7. (a) A plane of $H = 0^\circ$ in Fig. 2.7, (b) $H = 0^\circ$.

また, $A(i, j) < 0$ のときを見ると RGB 色空間の等色相平面上に画素が移動することがない. そのため, 式 (2.2) には $A(i, j) \geq 0$ という条件がある.

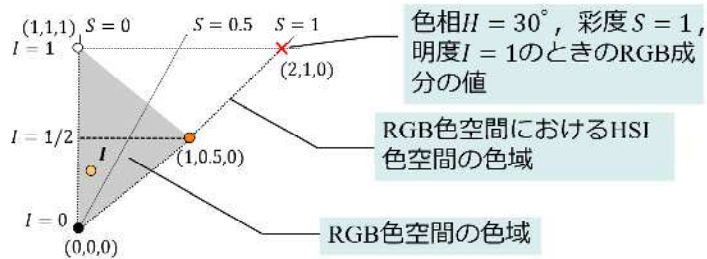
また, 入力画素 $\mathbf{I}(i, j)$ を以下のような白, 黒, 純色の凸結合によって表すことができる^{35,36}.

$$\mathbf{I}(i, j) = a_w(i, j)\mathbf{w} + a_k(i, j)\mathbf{k} + a_c(i, j)\mathbf{c}(i, j). \quad (2.4)$$

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. $a_w(i, j)$, $a_k(i, j)$,



(a)



(b)

図 2.9: 図 2.7 における $H = 30^\circ$ の平面. (a) 図 2.7 における $H = 30^\circ$ の平面, (b) $H = 30^\circ$ の平面.

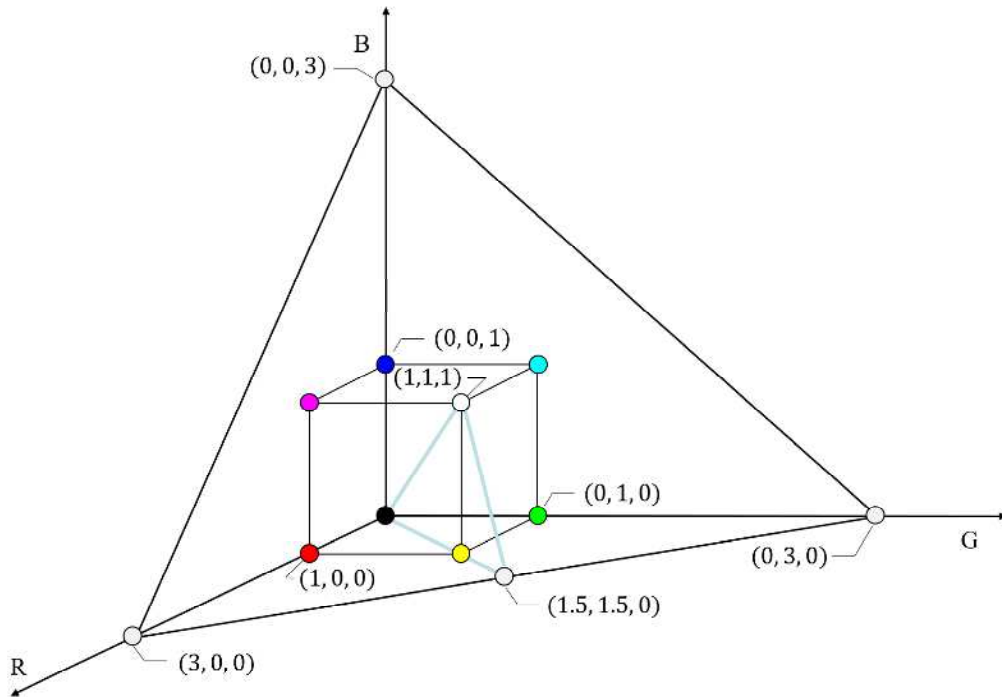
Fig. 2.9: A plane of $H = 30^\circ$ in Fig. 2.7. (a) A plane of $H = 30^\circ$ in Fig. 2.7, (b) $H = 30^\circ$.

$a_c(i, j)$ はそれぞれ以下の式によって求めることができる.

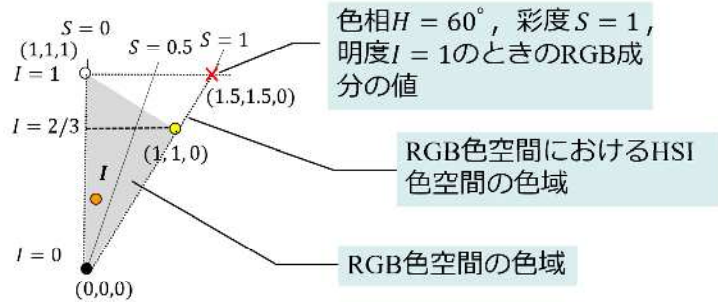
$$a_w(i, j) = \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \tag{2.5}$$

$$a_k(i, j) = 1 - \max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \tag{2.6}$$

$$a_c(i, j) = \max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) - \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j). \tag{2.7}$$



(a)



(b)

図 2.10: 図 2.7 における $H = 60^\circ$ の平面. (a) 図 2.7 における $H = 60^\circ$ の平面, (b) $H = 60^\circ$ の平面.

Fig. 2.10: A plane of $H = 60^\circ$ in Fig. 2.7. (a) A plane of $H = 60^\circ$ in Fig. 2.7, (b) $H = 60^\circ$.

各係数は以下の条件を持つ.

$$a_w(i, j) + a_k(i, j) + a_c(i, j) = 1, \quad (2.8)$$

$$0 \leq a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j) \leq 1. \quad (2.9)$$

このとき, $w, k, c(i, j), I(i, j)$ は一つの平面上に存在する. また, $I(i, j)$ は $w, k, c(i, j)$

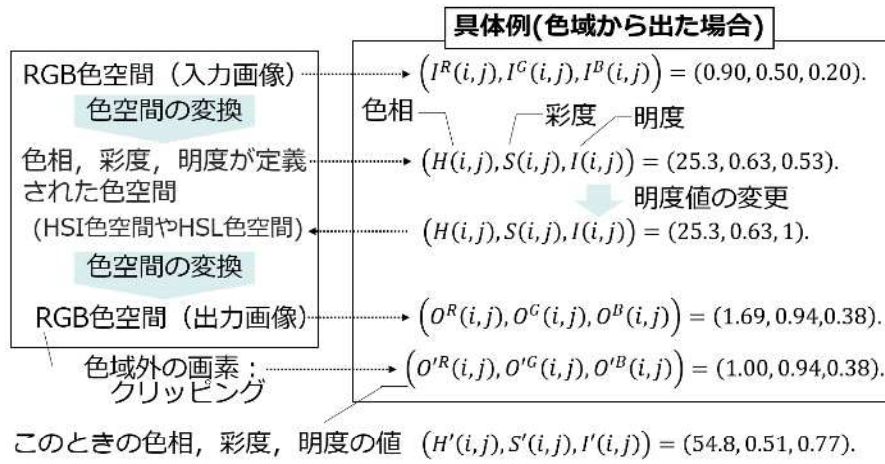


図 2.11: RGB 色空間の色域から逸脱した画素を画素値の範囲にクリッピングした場合の例.
 Fig. 2.11: An example of clipping a pixel that is outside the gamut of the RGB color space to a range of pixel values.

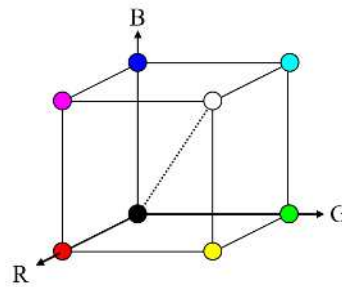


図 2.12: RGB 色空間.

Fig. 2.12: RGB color space.

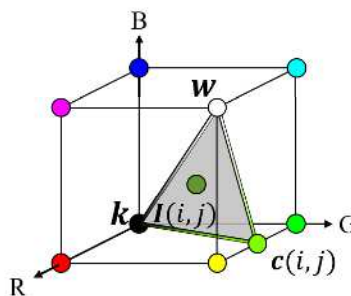


図 2.13: RGB 色空間における等色相平面.

Fig. 2.13: Equi-hue plane in RGB color space.

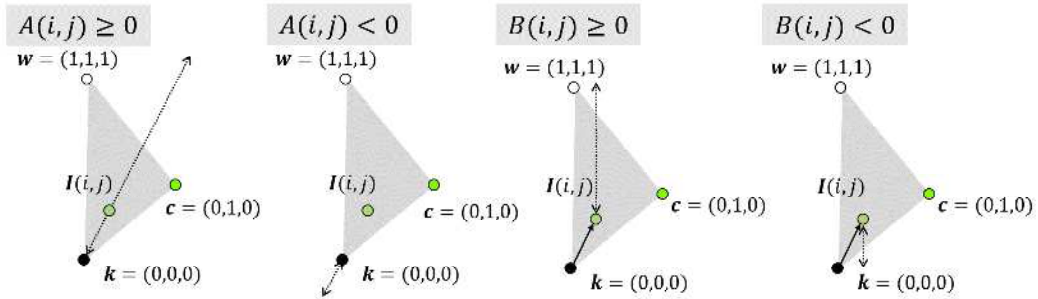


図 2.14: RGB 色空間の等色相平面において、式 (2.2) の $A(i, j)$ と $B(i, j)$ を変化させたときの画素の動き。

Fig. 2.14: Movement of pixel by $A(i, j)$ and $B(i, j)$ of Eq. (2.2) on equi-hue plane in RGB color space.

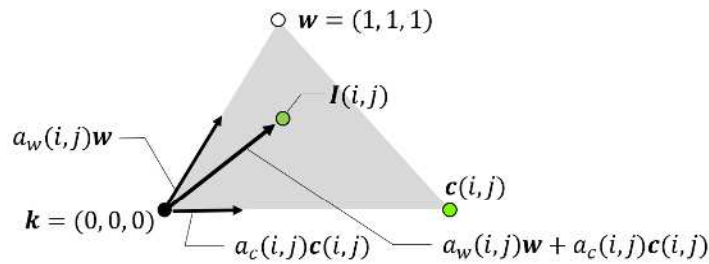


図 2.15: RGB 色空間における等色相平面上の画素の模式図。

Fig. 2.15: A schematic depiction of pixel on equi-hue plane in RGB color space.

の内点にあることが保証される。図 2.15 に RGB 色空間における等色相平面上の画素の模式図を示す。図 2.15 に示すように、画素は RGB 色空間における等色相平面上で表される。白、黒、純色の係数の条件を満たしつつ、これらの係数を変えることで色相や色域を保った処理が実現できる。

2.4 結言

本章では、まず、色変換を伴うカラー画像の強調について説明し、その問題点について述べた。デバイス独立色やマンセル表色系といった色空間の色域はディスプレイ表示可能な RGB 色空間の色域よりも広く定義されていた。そのため、これらの色空間に一度変換し、その色相、彩度、明度いずれかを変更し、表示のために RGB 色空間に逆変換を行うと、場合によっては、逆変換後の色が RGB 色空間の表示可能領域 (色域) から逸脱する「色域問題」が発生

していた．次に，RGB 色空間とその性質について説明した．RGB 色空間においては，Naik と Murthy の色相保存の条件式と白，黒，純色で構成された RGB 色空間の等色相平面があることを説明した．さらに，入力画素を白，黒，純色の凸結合によって表せることについて説明した．

付録 2.A CIE-1976L*a*b*

始めに，RGB 色空間から CIE-1976L*a*b*色空間への変換について述べる． $I^c(i, j)$ ， $c \in \{R, G, B\}$ を 24 ビット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 値とし，各成分値の範囲は $[0, 1]$ とする．まず，以下のようにしてリニア RGB 値 $I_{sRGB}^c(i, j)$ に変換する．

$$I_{sRGB}^c(i, j) = \begin{cases} \frac{I^c(i, j)}{12.92}, & I^c(i, j) \leq 0.04045 \\ \left(\frac{I^c(i, j) + 0.055}{1.055}\right)^{2.4}, & I^c(i, j) > 0.04045. \end{cases} \quad (2.A.1)$$

リニア RGB 値を CIE-XYZ 色空間へ変換する．

$$\begin{bmatrix} X(i, j) \\ Y(i, j) \\ Z(i, j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sRGB}^R(i, j) \\ I_{sRGB}^G(i, j) \\ I_{sRGB}^B(i, j) \end{bmatrix}. \quad (2.A.2)$$

ここで， $X(i, j)$ ， $Y(i, j)$ ， $Z(i, j)$ はそれぞれ CIE-XYZ 色空間の X 成分，Y 成分，Z 成分の値である．次に，CIE-XYZ 色空間から CIE-1976L*a*b*色空間への変換は以下の通りである．

$$L^*(i, j) = 116f\left(\frac{Y(i, j)}{Y_n}\right) - 16, \quad (2.A.3)$$

$$a^*(i, j) = 500\left(f\left(\frac{X(i, j)}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y(i, j)}{Y_n}\right)\right), \quad (2.A.4)$$

$$b^*(i, j) = 200\left(f\left(\frac{Y(i, j)}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z(i, j)}{Z_n}\right)\right), \quad (2.A.5)$$

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}}, & x > (24/116)^3, \\ \frac{841}{108}x + \frac{16}{116}, & x \leq (24/116)^3. \end{cases} \quad (2.A.6)$$

ここで， $L^*(i, j)$ ， $a^*(i, j)$ ， $b^*(i, j)$ はそれぞれ CIE-1976L*a*b*色空間の L*成分，a*成分，b*成分の値である． X_n ， Y_n ， Z_n は標準光 D₆₅ の三刺激値であり，それぞれ $X_n = 0.9505$ ， $Y_n =$

1.0000, $Z_n = 1.0891$ である. $L^*(i, j)$ は明度値である. $a^*(i, j), b^*(i, j)$ はそれぞれ, 赤-緑成分値, 黄-青成分値である. また, $a^*(i, j), b^*(i, j)$ によって色相, 彩度は以下のように定義される.

$$h(i, j) = \arctan \left(\frac{b^*(i, j)}{a^*(i, j)} \right), \quad (2.A.7)$$

$$C^*(i, j) = \sqrt{a^*(i, j)^2 + b^*(i, j)^2}. \quad (2.A.8)$$

ここで, $h(i, j), C^*(i, j)$ はそれぞれ色相, 彩度である.

次に, CIE-1976L*a*b*色空間から RGB 色空間への変換について述べる. まず, 以下のようにして CIE-1976L*a*b*色空間から CIE-XYZ 色空間への変換が行われる.

$$X(i, j) = X_n f^{-1} \left(\frac{L^*(i, j) + 16}{116} + \frac{a^*(i, j)}{500} \right), \quad (2.A.9)$$

$$Y(i, j) = Y_n f^{-1} \left(\frac{L^*(i, j) + 16}{116} \right), \quad (2.A.10)$$

$$Z(i, j) = Z_n f^{-1} \left(\frac{L^*(i, j) + 16}{116} - \frac{b^*(i, j)}{200} \right), \quad (2.A.11)$$

$$f^{-1}(y) = \begin{cases} y^3, & y > 16/116, \\ 3 \frac{16}{116}^2 \left(y - \frac{16}{116} \right), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.A.12)$$

ここで, $f^{-1}(y)$ は式 (2.A.6) の逆関数である. 次に, 以下のようにして CIE-XYZ 色空間をリニア RGB 値へ変換する.

$$\begin{bmatrix} I_{sRGB}^R(i, j) \\ I_{sRGB}^G(i, j) \\ I_{sRGB}^B(i, j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(i, j) \\ Y(i, j) \\ Z(i, j) \end{bmatrix}. \quad (2.A.13)$$

最後に, 以下のようにしてリニア RGB 値をノンリニア RGB 値, すなわち RGB 色空間へ変換する.

$$I^c(i, j) = \begin{cases} 12.92 I_{sRGB}^c(i, j), & I_{sRGB}^c(i, j) \leq 0.0031308, \\ 1.055 I_{sRGB}^c(i, j)^{\frac{1}{2.4}}, & I_{sRGB}^c(i, j) > 0.0031308. \end{cases} \quad (2.A.14)$$

付録 2.B HSI 色空間

始めに, RGB 色空間から HSI 色空間への変換について述べる. $I^c(i, j)$, $c \in \{R, G, B\}$ を 24 ビットフルカラー画像における画素の RGB 値とし, 各成分値の範囲は $[0, 1]$ とする. 色相 $H(i, j)$ は以下のように定義される.

$$H(i, j) = \begin{cases} \theta, & I^B(i, j) \leq I^G(i, j), \\ 360^\circ - \theta, & I^B(i, j) > I^G(i, j), \end{cases} \quad (2.B.1)$$

$$\theta(i, j) = \cos^{-1} \left[\frac{\{(I^R(i, j) - I^G(i, j)) + (I^R(i, j) - I^B(i, j))\}/2}{\sqrt{(I^R(i, j) - I^G(i, j))^2 + (I^R(i, j) - I^B(i, j))(I^G(i, j) - I^B(i, j))}} \right]. \quad (2.B.2)$$

彩度 $S(i, j)$ は以下で求めることができる.

$$S(i, j) = 1 - \frac{3}{\sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j)} \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j). \quad (2.B.3)$$

明度 $I(i, j)$ は以下で定義される.

$$I(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j). \quad (2.B.4)$$

HSI 色空間から RGB 色空間への変換では, まず, 以下のような $H'(i, j)$ を計算する.

$$H'(i, j) = \begin{cases} H(i, j), & 0^\circ \leq H(i, j) < 120^\circ, \\ H(i, j) - 120^\circ, & 120^\circ \leq H(i, j) < 240^\circ, \\ H(i, j) - 240^\circ, & 240^\circ \leq H(i, j) < 360^\circ. \end{cases} \quad (2.B.5)$$

次に, 以下のように定義される $C_1(i, j)$, $C_2(i, j)$, $C_3(i, j)$ を求める.

$$C_1(i, j) = I(i, j)(1 - S(i, j)), \quad (2.B.6)$$

$$C_2(i, j) = I(i, j) \left(1 + \frac{S(i, j) \cos(H'(i, j))}{\cos(60^\circ - H'(i, j))} \right), \quad (2.B.7)$$

$$C_3(i, j) = I(i, j) \left(1 + \frac{S(i, j) (\cos(60^\circ - H'(i, j)) - \cos(H'(i, j)))}{\cos(60^\circ - H'(i, j))} \right). \quad (2.B.8)$$

$H(i, j)$ の値に応じて、以下のようにして RGB 値が求まる。

$$I^R(i, j) = \begin{cases} C_2(i, j), & 0^\circ \leq H(i, j) < 120^\circ, \\ C_1(i, j), & 120^\circ \leq H(i, j) < 240^\circ, \\ C_3(i, j), & 240^\circ \leq H(i, j) < 360^\circ, \end{cases} \quad (2.B.9)$$

$$I^G(i, j) = \begin{cases} C_3(i, j), & 0^\circ \leq H(i, j) < 120^\circ, \\ C_2(i, j), & 120^\circ \leq H(i, j) < 240^\circ, \\ C_1(i, j), & 240^\circ \leq H(i, j) < 360^\circ, \end{cases} \quad (2.B.10)$$

$$I^B(i, j) = \begin{cases} C_1(i, j), & 0^\circ \leq H(i, j) < 120^\circ, \\ C_3(i, j), & 120^\circ \leq H(i, j) < 240^\circ, \\ C_2(i, j), & 240^\circ \leq H(i, j) < 360^\circ. \end{cases} \quad (2.B.11)$$

付録 2.C HSL 色空間

始めに、RGB 色空間から HSL 色空間への変換について述べる。 $I^c(i, j)$, $c \in \{R, G, B\}$ を 24 ビットフルカラー画像における画素の RGB 値とし、各成分値の範囲は $[0, 1]$ とする。色相 $H(i, j)$ は以下のように定義される。

$$H(i, j) = \begin{cases} \frac{I^G(i, j) - I^B(i, j)}{I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3}, & I_{max}(i, j) = I^R(i, j), \\ \frac{I^B(i, j) - I^R(i, j)}{I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3} + \frac{2}{3}\pi, & I_{max}(i, j) = I^G(i, j), \\ \frac{I^R(i, j) - I^G(i, j)}{I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3} + \frac{4}{3}\pi, & I_{max}(i, j) = I^B(i, j), \end{cases} \quad (2.C.1)$$

$$I_{max}(i, j) = \max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \quad (2.C.2)$$

$$I_{min}(i, j) = \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j). \quad (2.C.3)$$

ただし、 $H(i, j) < 0$ のとき $H(i, j)$ に 2π を加える。また、 $I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j) = 0$ のとき $H(i, j)$ は不定とする。明度 $L(i, j)$ は以下で定義される。

$$L(i, j) = \frac{I_{max}(i, j) + I_{min}(i, j)}{2}. \quad (2.C.4)$$

彩度 $S(i, j)$ は以下で求めることができる.

$$S(i, j) = \begin{cases} \frac{I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j)}{I_{max}(i, j) + I_{min}(i, j)}, & L(i, j) \leq 0.5, \\ \frac{I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j)}{2 - (I_{max}(i, j) + I_{min}(i, j))}, & L(i, j) > 0.5. \end{cases} \quad (2.C.5)$$

ただし, $I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j) = 0$ のとき $S(i, j)$ は 0 とする.

HSL 色空間から RGB 色空間への変換では, まず, 以下のような $M_1(i, j)$, $M_2(i, j)$ を計算する.

$$M_1(i, j) = 2L(i, j) - M_2(i, j), \quad (2.C.6)$$

$$M_2(i, j) = \begin{cases} L(i, j)(1 + S(i, j)), & L(i, j) \leq 0.5, \\ L(i, j) + S(i, j) - L(i, j)S(i, j), & L(i, j) > 0.5. \end{cases} \quad (2.C.7)$$

RGB 値は以下のような変換式で求まる.

$$I^R(i, j) = T(i, j), \quad (2.C.8)$$

$$I^G(i, j) = T(i, j), \quad (2.C.9)$$

$$I^B(i, j) = T(i, j), \quad (2.C.10)$$

$$T(i, j) = \begin{cases} M_1(i, j) + (M_2(i, j) - M_1(i, j))\frac{3}{\pi}H'(i, j), & H'(i, j) < \frac{\pi}{3}, \\ M_2(i, j), & \frac{\pi}{3} \leq H'(i, j) < \pi, \\ M_1(i, j) + (M_2(i, j) - M_1(i, j))(4 - \frac{3}{\pi}H'(i, j)), & \pi \leq H'(i, j) < \frac{4}{3}\pi, \\ M_1(i, j), & \frac{4}{3}\pi \leq H'(i, j) \leq 2\pi, \end{cases} \quad (2.C.11)$$

ここで, $H'(i, j)$ は RGB 成分に応じて, 以下のような変換が行われる.

$$H'(i, j) = \begin{cases} H(i, j) + \frac{2}{3}\pi, & \text{R 成分を計算する場合,} \\ H(i, j), & \text{G 成分を計算する場合,} \\ H(i, j) - \frac{2}{3}\pi, & \text{B 成分を計算する場合.} \end{cases} \quad (2.C.12)$$

付録 2.D 平面のパラメータ表示

$\mathbf{k} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{w} = (1, 1, 1)$, $\mathbf{I}(i, j) = (I^R(i, j), I^G(i, j), I^B(i, j))$ の 3 点を含む平面のパラメータ表示について説明する. 空間内の 3 点 \mathbf{k} , \mathbf{w} , $\mathbf{I}(i, j)$ を通る平面を考える. 図 2.D.1 は \mathbf{k} ,

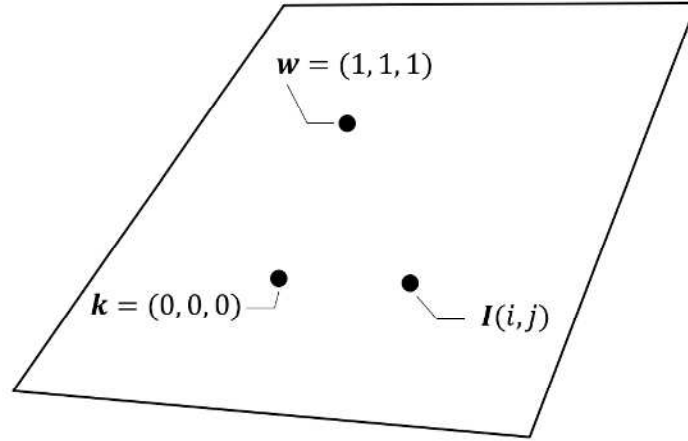


図 2.D.1: \mathbf{k} , \mathbf{w} , $\mathbf{I}(i, j)$ を通る平面の模式図.

Fig. 2.D.1: A schematic depiction of a plane passing through \mathbf{k} , \mathbf{w} , and $\mathbf{I}(i, j)$.

\mathbf{w} , $\mathbf{I}(i, j)$ を通る平面の模式図である. この平面上のある点 $\mathbf{I}'(i, j) = (I'^R(i, j), I'^G(i, j), I'^B(i, j))$ を考えると, 図 2.D.2 のようになる. つまり, \mathbf{k} , \mathbf{w} , $\mathbf{I}(i, j)$ を用いて以下のように表すことができる.

$$\mathbf{I}'(i, j) = \mathbf{k} + s(\mathbf{w} - \mathbf{k}) + t(\mathbf{I}(i, j) - \mathbf{k}). \quad (2.D.1)$$

ここで, s , t は媒介変数 (パラメータ) であり, 式 (2.D.1) は平面のパラメータ表示である. また, $\mathbf{k} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{w} = (1, 1, 1) = \mathbf{e}$, $s = B(i, j)$, $t = A(i, j)$ とすると, 式 (2.D.1) は式 (2.2) と同じになる.

付録 2.E Naik と Murthy の色相保存の条件式と HSI 色空間, HSL 色空間の色相

始めに, HSI 色空間の色相の場合について述べる. HSI 色空間の色相の定義は付録 2.B に記載されている. 式 (2.2) の $\mathbf{I}'(i, j) = (I'^R(i, j), I'^G(i, j), I'^B(i, j))$ を HSI 色空間における色相に代入すると, 以下のようなになる.

$$H_{I'}(i, j) = \begin{cases} \theta_{I'}, & I'^B(i, j) \leq I'^G(i, j), \\ 360^\circ - \theta_{I'}, & I'^B(i, j) > I'^G(i, j), \end{cases} \quad (2.E.1)$$

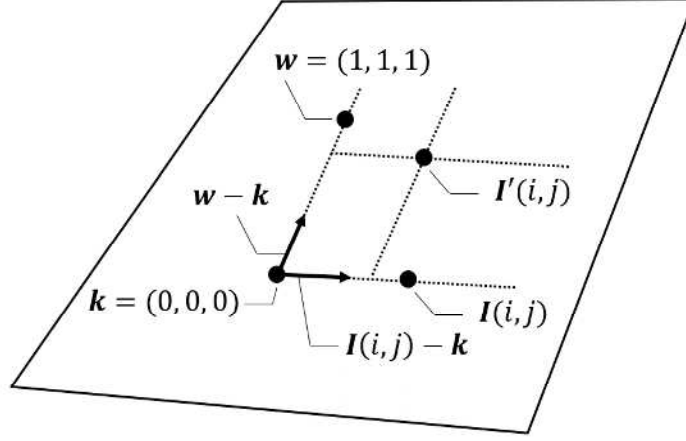


図 2.D.2: \mathbf{k} , \mathbf{w} , $\mathbf{I}(i, j)$ を通る平面とある点 $\mathbf{I}'(i, j)$.

Fig. 2.D.2: A plane passing through \mathbf{k} , \mathbf{w} , and $\mathbf{I}(i, j)$, and a point $\mathbf{I}'(i, j)$.

$$\theta_{I'}(i, j) = \cos^{-1} \left[\frac{\{(I'^R(i, j) - I'^G(i, j)) + (I'^R(i, j) - I'^B(i, j))\}/2}{\sqrt{(I'^R(i, j) - I'^G(i, j))^2 + (I'^R(i, j) - I'^B(i, j))(I'^G(i, j) - I'^B(i, j))}} \right]. \quad (2.E.2)$$

$(I'^R(i, j), I'^G(i, j), I'^B(i, j)) = (A(i, j)I^R(i, j) + B(i, j), A(i, j)I^G(i, j) + B(i, j), A(i, j)I^B(i, j) + B(i, j))$ である. 式 (2.E.1) の $I'^B(i, j) \leq I'^G(i, j)$ は $A(i, j)I^B(i, j) + B(i, j) \leq A(i, j)I^G(i, j) + B(i, j)$ となり, 整理すると, $I^B(i, j) \leq I^G(i, j)$ である. $I'^B(i, j) > I'^G(i, j)$ も同様にして, $I^B(i, j) > I^G(i, j)$ となる. また, $I'^R(i, j) - I'^G(i, j) = A(i, j)I^R(i, j) + B(i, j) - (A(i, j)I^G(i, j) + B(i, j))$ であり, 整理すると, $I'^R(i, j) - I'^G(i, j) = A(i, j)(I^R(i, j) - I^G(i, j))$ になる. このような整理を式 (2.E.2) における逆余弦関数の分子にすると, 以下のようなになる.

$$[A(i, j) \{(I^R(i, j) - I^G(i, j)) + (I^R(i, j) - I^B(i, j))\}] / 2. \quad (2.E.3)$$

逆余弦関数の分母については以下のようなになる.

$$\sqrt{A(i, j)^2 \{(I^R(i, j) - I^G(i, j))^2 + (I^R(i, j) - I^B(i, j))(I^G(i, j) - I^B(i, j))\}} \quad (2.E.4)$$

そのため, 式 (2.E.2) は以下のようなになる.

$$\theta_{I'} = \cos^{-1} \left[\frac{\{(I^R(i, j) - I^G(i, j)) + (I^R(i, j) - I^B(i, j))\}/2}{\sqrt{(I^R(i, j) - I^G(i, j))^2 + (I^R(i, j) - I^B(i, j))(I^G(i, j) - I^B(i, j))}} \right]. \quad (2.E.5)$$

これは $\mathbf{I}(i, j)$ を計算する場合と同じである. 式 (2.E.1) における B 成分と G 成分の比較も $\mathbf{I}(i, j)$ のときと同じである. したがって, $\mathbf{I}'(i, j)$ の色相は $\mathbf{I}(i, j)$ の色相と等しい.

次に, HSL 色空間の色相の場合について述べる. HSL 色空間の色相の定義は付録 2.C に記載されている. 式 (2.2) の $\mathbf{I}'(i, j) = (I'^R(i, j), I'^G(i, j), I'^B(i, j))$ を HSL 色空間における色相に代入すると, 以下のようになる.

$$H_{I'}(i, j) = \begin{cases} \frac{I'^G(i, j) - I'^B(i, j)}{I'_{max}(i, j) - I'_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3}, & I'_{max}(i, j) = I'^R(i, j), \\ \frac{I'^B(i, j) - I'^R(i, j)}{I'_{max}(i, j) - I'_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3} + \frac{2}{3}\pi, & I'_{max}(i, j) = I'^G(i, j), \\ \frac{I'^R(i, j) - I'^G(i, j)}{I'_{max}(i, j) - I'_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3} + \frac{4}{3}\pi, & I'_{max}(i, j) = I'^B(i, j), \end{cases} \quad (2.E.6)$$

$$I'_{max}(i, j) = \max_{c \in \{R, G, B\}} I'^c(i, j), \quad (2.E.7)$$

$$I'_{min}(i, j) = \min_{c \in \{R, G, B\}} I'^c(i, j). \quad (2.E.8)$$

$I'^c(i, j) = A(i, j)I^c(i, j) + B(i, j)$ であるから, $I'_{max}(i, j)$ と $I'_{min}(i, j)$ はそれぞれ以下のようになる.

$$I'_{max}(i, j) = A(i, j) \max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) + B(i, j), \quad (2.E.9)$$

$$I'_{min}(i, j) = A(i, j) \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) + B(i, j). \quad (2.E.10)$$

式 (2.E.6) の条件 $I'_{max}(i, j) = I'^R(i, j)$ は $A(i, j) \max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) + B(i, j) = A(i, j)I^R(i, j) + B(i, j)$ であるから, 整理すると, $\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) = I^R(i, j)$ になる. 他の条件 $I'_{max}(i, j) = I'^G(i, j)$, $I'_{max}(i, j) = I'^B(i, j)$ も同様にして $\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) = I^G(i, j)$, $\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) = I^B(i, j)$ になる. 次に, 式 (2.E.6) の条件 $I'_{max}(i, j) = I'^R(i, j)$ のときの色相の計算においては, 以下のようになる.

$$\frac{A(i, j)(I^G(i, j) - I^B(i, j))}{A(i, j)(\max_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) - \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j))} \frac{\pi}{3}. \quad (2.E.11)$$

他の条件でも同様に整理すると, 式 (2.E.6) は以下のようになる.

$$H_{I'}(i, j) = \begin{cases} \frac{I^G(i, j) - I^B(i, j)}{I'_{max}(i, j) - I'_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3}, & I'_{max}(i, j) = I^R(i, j), \\ \frac{I^B(i, j) - I^R(i, j)}{I'_{max}(i, j) - I'_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3} + \frac{2}{3}\pi, & I'_{max}(i, j) = I^G(i, j), \\ \frac{I^R(i, j) - I^G(i, j)}{I'_{max}(i, j) - I'_{min}(i, j)} \frac{\pi}{3} + \frac{4}{3}\pi, & I'_{max}(i, j) = I^B(i, j). \end{cases} \quad (2.E.12)$$

これは $\mathbf{I}(i, j)$ を計算する場合と同じである. したがって, HSL 色空間で定義される色相においても $\mathbf{I}'(i, j)$ の色相は $\mathbf{I}(i, j)$ の色相と等しい.

第3章 低照度画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調法

3.1 緒言

本章では，低照度画像に対して RGB 色空間の色域を保証した色相保存型の画像強調手法について述べる．低照度画像を対象とした従来の強調法においては，色域問題の発生や色相が保存されていないことによって，明るい領域で詳細部が消失することや不自然な色合いになるという問題点があった．本章では，これらの問題を解決する．

3.2 節では，低照度画像について述べる．3.3 節では，低照度画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調手法について説明する．提案手法では，白，黒，純色によって構成される RGB 色空間の等色相平面上で処理が実現される．入力画素は白，黒，純色の凸結合によって表され，その結合係数に対し，暗い画素のみを明るくする修正ガンマ変換が適用される．さらに，ガンマ分布の関数に従うフィルタ係数を持つフィルタ処理によって黒のヒストグラムが平滑化され，その平滑化ヒストグラムを目標としたヒストグラム指定法によってコントラストが改善される．3.4 節は比較実験である．比較実験では，各提案手法と従来手法との比較実験により提案手法の有効性を明らかにする．3.5 節では，本章を総括する．

3.2 低照度画像

低照度画像ではほとんどの画素が暗い．画素を白，黒，純色の凸結合で考えると，これらの画素は a_w や a_c の値が小さく， a_k の値が大きい．図 3.1 は低照度画像の例である．図 3.1(a) は原画像である．図 3.1(b)，(c)，(d) はそれぞれ図 3.1(a) の a_w ， a_k ， a_c のヒストグラムである．図 3.1(c) に示すように， a_k は大きい値を持つ傾向にある．対して，図 3.1(b)，(d) に示すように， a_w と a_c は小さい値を持つ傾向にある．

図 3.2 はある暗い画素 $I(i, j)$ の等色相平面の例である．図 3.2 に示すように，暗い画素は黒 k の周辺に存在する．つまり，暗い画像では，ほとんどの画素が黒 k の周辺に存在するこ

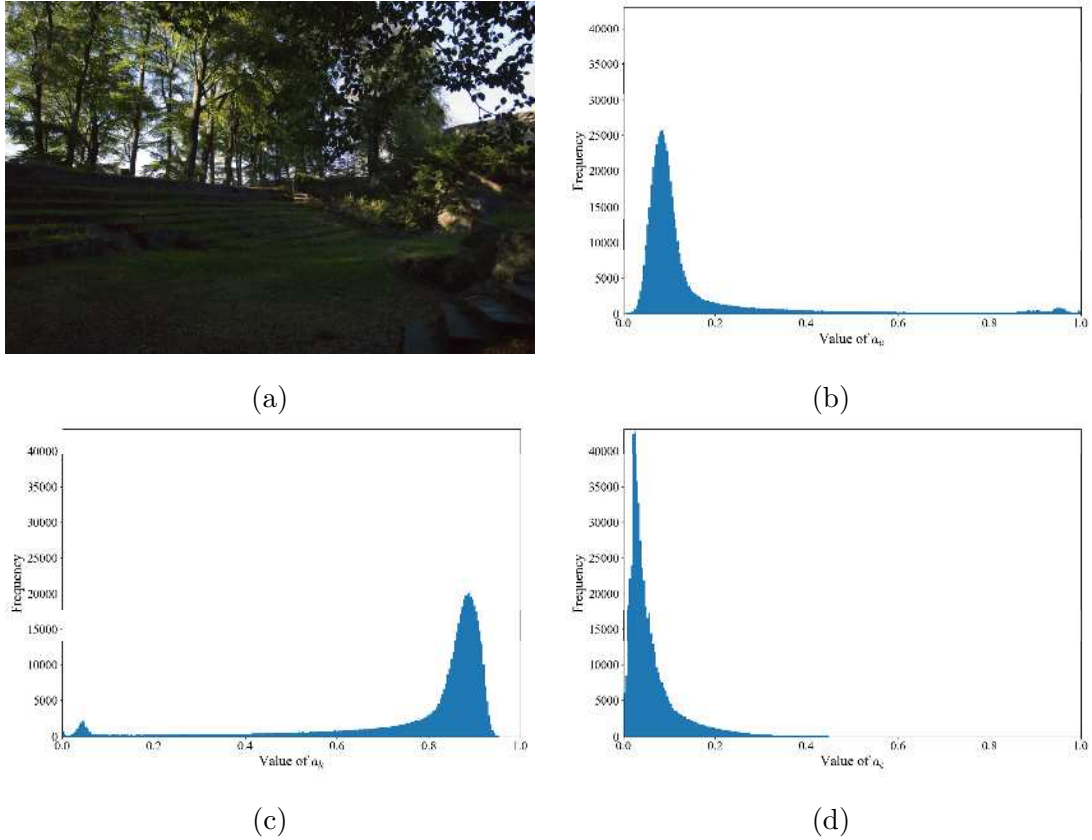


図 3.1: 低照度画像とその a_w, a_k, a_c のヒストグラム. (a) 低照度画像, (b) a_w のヒストグラム, (c) a_k のヒストグラム, (d) a_c のヒストグラム.

Fig. 3.1: Low-light image and its histograms of a_w, a_k and a_c . (a) Low-light image, (b) histogram of a_w , (c) histogram of a_k , (d) histogram of a_c .

とになる. 提案手法では, a_w と a_c の比を保ちながら a_w と a_c の値を大きくすることで, 黒 k の周辺に偏った画素を広げる.

3.3 低照度画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調

図 3.3 に提案手法の処理のフローを示す. 提案手法は修正ガンマ変換, ヒストグラムの平滑化とヒストグラム指定法から構成されている. まず, 修正ガンマ変換について説明する. $I(i, j)$ は黒 k を始点とした白 w と純色 $c(i, j)$ のベクトルで表すことができる. 図 3.2 に示すように, 画素 $I(i, j)$ は白のベクトル $a_w(i, j)w$ と純色のベクトル $a_c(i, j)c(i, j)$ の合成ベクトルである. 修正ガンマ変換では, 入力画素 $I(i, j)$ の大きさ (長さ) を大きくすることで, a_w と

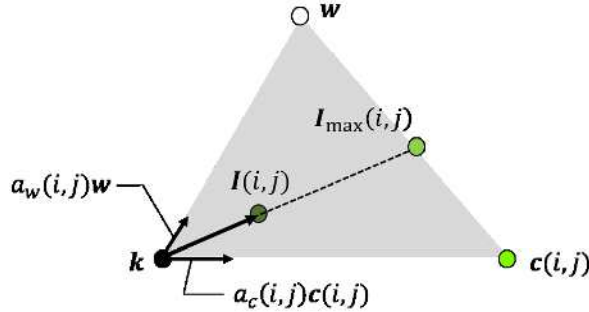


図 3.2: 画素 $I(i, j)$ の等色相平面.

Fig. 3.2: An equi-hue plane of a pixel $I(i, j)$.

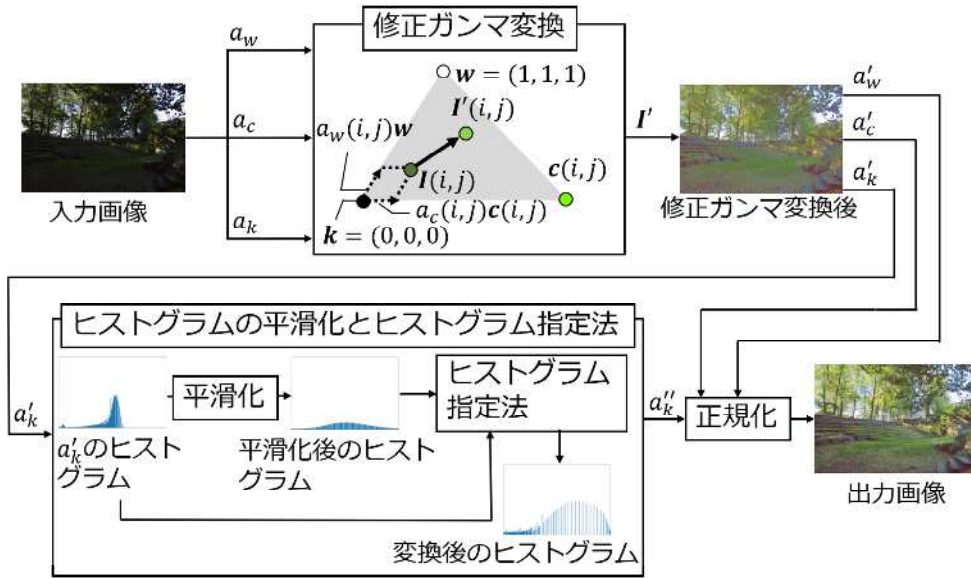


図 3.3: 低照度画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調手法のフロー.

Fig. 3.3: Flow of image enhancement on equi-hue plane in RGB color space for low-light image.

a_c の比を保ちながら a_w と a_c の値を大きくする. $I(i, j)$ は辺 $wc(i, j)$ まで大きくすることができる. $I(i, j)$ を辺 $wc(i, j)$ まで大きくしたときの交点を $I_{\max}(i, j)$ とする. ここで, $I_{\max}(i, j)$ を求めるために, k と $I(i, j)$ を結ぶ直線における任意の点を $P_{k,I}(i, j)$, w と $c(i, j)$ を結ぶ直線における任意の点を $P_{w,c}(i, j)$ とすると, それぞれ以下のように定義することができる.

$$P_{k,I}(i, j) = k + s_{k,I}(i, j)(I(i, j) - k), \quad (3.1)$$

$$P_{w,c}(i, j) = w + s_{w,c}(i, j)(c(i, j) - w). \quad (3.2)$$

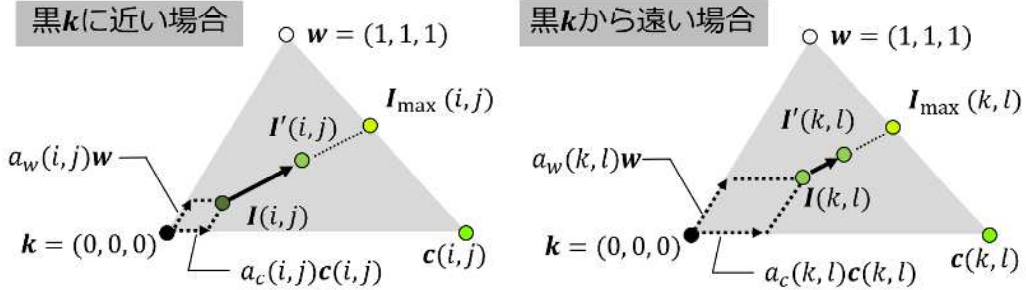


図 3.4: 修正ガンマ変換による画素の動きの模式図.

 Fig. 3.4: An equi-hue plane of a pixel $I(i, j)$.

ここで、 $s_{k,I}(i, j)$ と $s_{w,c}(i, j)$ は定数である。 $I_{\max}(i, j)$ は k と $I(i, j)$ を結ぶ直線と、 w と $c(i, j)$ を結ぶ直線の交点であるから、以下が成り立つ。

$$P_{k,I}(i, j) = P_{w,c}(i, j), \quad (3.3)$$

$$k + s_{k,I}(i, j)(I(i, j) - k) = w + s_{w,c}(i, j)(c(i, j) - w). \quad (3.4)$$

$k = (0, 0, 0)$, $I(i, j) = a_w(i, j)w + a_c(i, j)c(i, j)$ とすると、以下のようなになる。

$$s_{k,I}(i, j)a_w(i, j)w + s_{k,I}(i, j)a_c(i, j)c(i, j) = (1 - s_{w,c}(i, j))w + s_{w,c}(i, j)c(i, j). \quad (3.5)$$

このとき、 $s_{k,I}(i, j)a_w(i, j) = 1 - s_{w,c}(i, j)$, $s_{k,I}(i, j)a_c(i, j) = s_{w,c}(i, j)$ が成り立つ。そのため、

$$s_{k,I}(i, j) = \frac{1}{a_w(i, j) + a_c(i, j)}, \quad (3.6)$$

$$s_{w,c}(i, j) = \frac{a_c(i, j)}{a_w(i, j) + a_c(i, j)}, \quad (3.7)$$

となる。式 (3.1) に上記で算出した $s_{k,I}(i, j)$ を代入すると、 $I_{\max}(i, j)$ は以下で求めることができる。

$$I_{\max}(i, j) = \frac{a_w(i, j)}{a_w(i, j) + a_c(i, j)}w + \frac{a_c(i, j)}{a_w(i, j) + a_c(i, j)}c(i, j). \quad (3.8)$$

また、修正ガンマ変換では、図 3.4 に示すような入力画素が黒 k に近いほど大きく動かし、黒 k に遠いほど小さく動かすような変換を実現する。

入力画素 $\mathbf{I}(i, j)$ の大きさ (長さ) を大きくするために, 入力画素のユークリッドノルム $\|\mathbf{I}(i, j)\|_2$ に対して, 以下の修正ガンマ変換を適用する.

$$\|\mathbf{I}'(i, j)\|_2 = \frac{\|\mathbf{I}(i, j)\|_2^{\frac{1}{\gamma(i, j)}}}{\|\mathbf{I}_{\max}(i, j)\|_2}, \quad (3.9)$$

$$\gamma(i, j) = (\alpha - 1) \left(1 - \frac{\|\mathbf{I}(i, j)\|_2}{\|\mathbf{I}_{\max}(i, j)\|_2} \right)^\beta + 1, \quad (3.10)$$

$$\|\mathbf{I}(i, j)\|_2 = \sqrt{\sum_{c' \in \{R, G, B\}} (a_w(i, j) + a_c(i, j)c^{c'}(i, j))^2}, \quad (3.11)$$

$$\|\mathbf{I}_{\max}(i, j)\|_2 = \sqrt{\sum_{c' \in \{R, G, B\}} \left(\frac{a_w(i, j)}{a_w(i, j) + a_c(i, j)} + \frac{a_c(i, j)}{a_w(i, j) + a_c(i, j)} c^{c'}(i, j) \right)^2}. \quad (3.12)$$

ここで, α と β はパラメータであり, $\alpha \geq 1$, $\beta \geq 0$ である. 式 (3.9) の上限値は $\|\mathbf{I}_{\max}(i, j)\|_2$ であるため, RGB 色空間の等色相平面から出ない. 式 (3.10) の $\gamma(i, j)$ は α から 1 に変化する. そのため, 式 (3.9) は $\|\mathbf{I}(i, j)\|_2 / \|\mathbf{I}_{\max}(i, j)\|_2$ が大きいほど, 恒等変換に近づく. つまり, 式 (3.9) は明るい画素は動かさず, 暗い画素のみを明るくする式である. 明るい画素を動かさないことで, 明るい領域の詳細部の消失が抑制される.

図 3.5 に修正ガンマ変換における $\|\mathbf{I}'(i, j)\|_2$ と $\gamma(i, j)$ についてのグラフを示す. 図 3.5(a) の黒線は $(\alpha = 2, \beta = 0)$ のときの $\|\mathbf{I}'(i, j)\|_2$ のグラフである. 赤線と緑線はそれぞれ $(\alpha = 2, \beta = 1)$ と $(\alpha = 2, \beta = 2)$ のときの $\|\mathbf{I}'(i, j)\|_2$ のグラフである. 青線とマゼンタ線はそれぞれ $(\alpha = 3, \beta = 1)$ と $(\alpha = 3, \beta = 2)$ のときの $\|\mathbf{I}'(i, j)\|_2$ のグラフである. 図 3.5(b) の色線は図 3.5(a) と同様である. 図 3.5(b) の黒線に示すように, $(\alpha = 2, \beta = 0)$ のとき $\gamma(i, j)$ は 2 のままである. つまり, $\beta = 0$ のときの修正ガンマ変換は通常のガンマ変換になることを意味している. 図 3.5(a) に示すように, α が大きくなるにつれて出力が大きくなっている. α は修正ガンマ変換の変化の大きさを調節するパラメータである. 図 3.5(b) に示すように, β が大きくなるにつれて $\gamma(i, j)$ が曲線になっている. β は $\gamma(i, j)$ が α から 1 になるまでの範囲を決めるパラメータである. $\|\mathbf{I}(i, j)\|_2$ から $\mathbf{I}'(i, j)$ への変換は以下の通りである.

$$\mathbf{I}'(i, j) = \frac{\|\mathbf{I}'(i, j)\|_2}{\|\mathbf{I}(i, j)\|_2} \mathbf{I}(i, j). \quad (3.13)$$

図 3.6 に修正ガンマ変換適用後の結果画像の例を示す. 図 3.6(a) は図 3.1(a) に修正ガンマ変換を適用した結果画像である. 図 3.6(b), (c), (d) はそれぞれ図 3.6(a) の a'_w , a'_k , a'_c のヒストグラムである. 図 3.6(a) に示すように, 画像は全体的に明るくなったが, 画像のコント

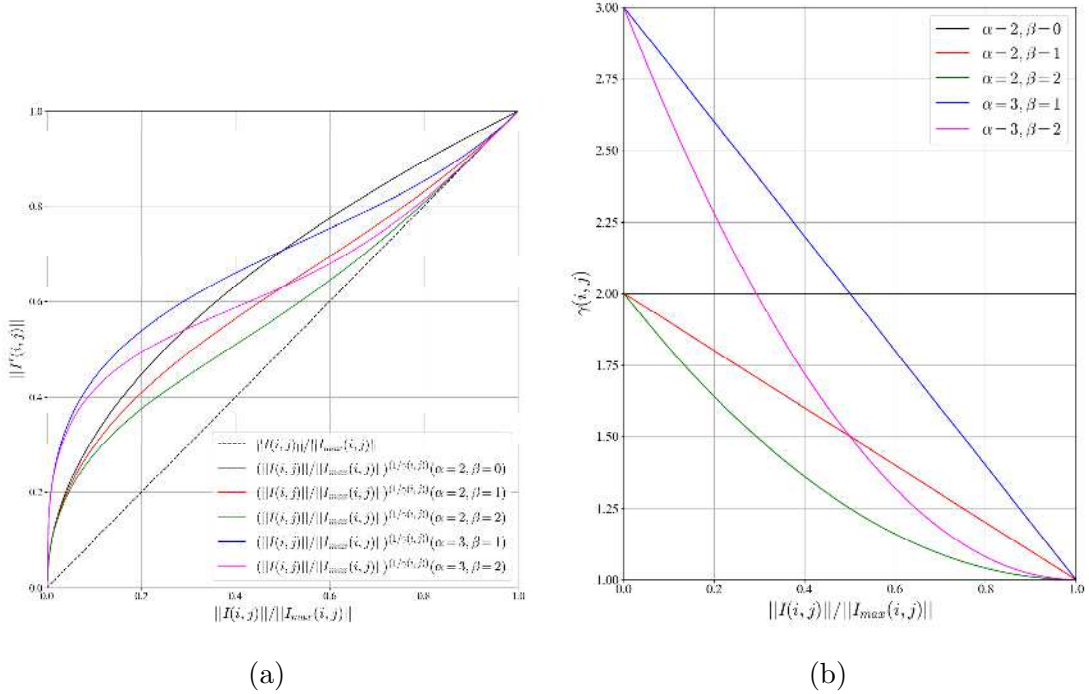


図 3.5: 修正ガンマ変換における $\|I'(i, j)\|_2$ と $\gamma(i, j)$ のグラフ. (a) $\|I'(i, j)\|_2$, (b) $\gamma(i, j)$.
 Fig. 3.5: Graphs of $\|I'(i, j)\|_2$ and $\gamma(i, j)$ of modified gamma transform. (a) $\|I'(i, j)\|_2$, (b) $\gamma(i, j)$.

ラストは改善していないことが分かる. 図 3.6(c) に示すように, 修正ガンマ変換後の a'_k のヒストグラムは中央に偏っている.

次に, ヒストグラムの平滑化とヒストグラム指定法について説明する. これらの処理によって, 明るい画素をあまり動かさずに a'_k のヒストグラムの偏りをなくし, 画像のコントラストを改善する. 具体的には, ガンマ分布の関数に従うフィルタ係数によるフィルタ処理によって黒のヒストグラムを平滑化し, 平滑化したヒストグラムを目標としたヒストグラム指定法を a'_k のヒストグラムに適用する.

ヒストグラム指定法は処理後のヒストグラムが, ある特定のヒストグラム (目標のヒストグラム) に近づくように画素値を変換する処理である^{7,70}. 提案手法における目標のヒストグラムは, a'_k のヒストグラムをガンマ分布の関数に従うフィルタ係数によって平滑化したヒストグラムである. 提案手法では, まず, a'_k のヒストグラムを以下のようにして求める.

$$h_{k'}(x) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \delta(x/255, a'_k(i, j)), \quad \forall x \in [0, 255]. \quad (3.14)$$

ここで, M と N はそれぞれ画像の縦と横の画素数である. $\delta(\cdot)$ はクロネッカーのデルタであ

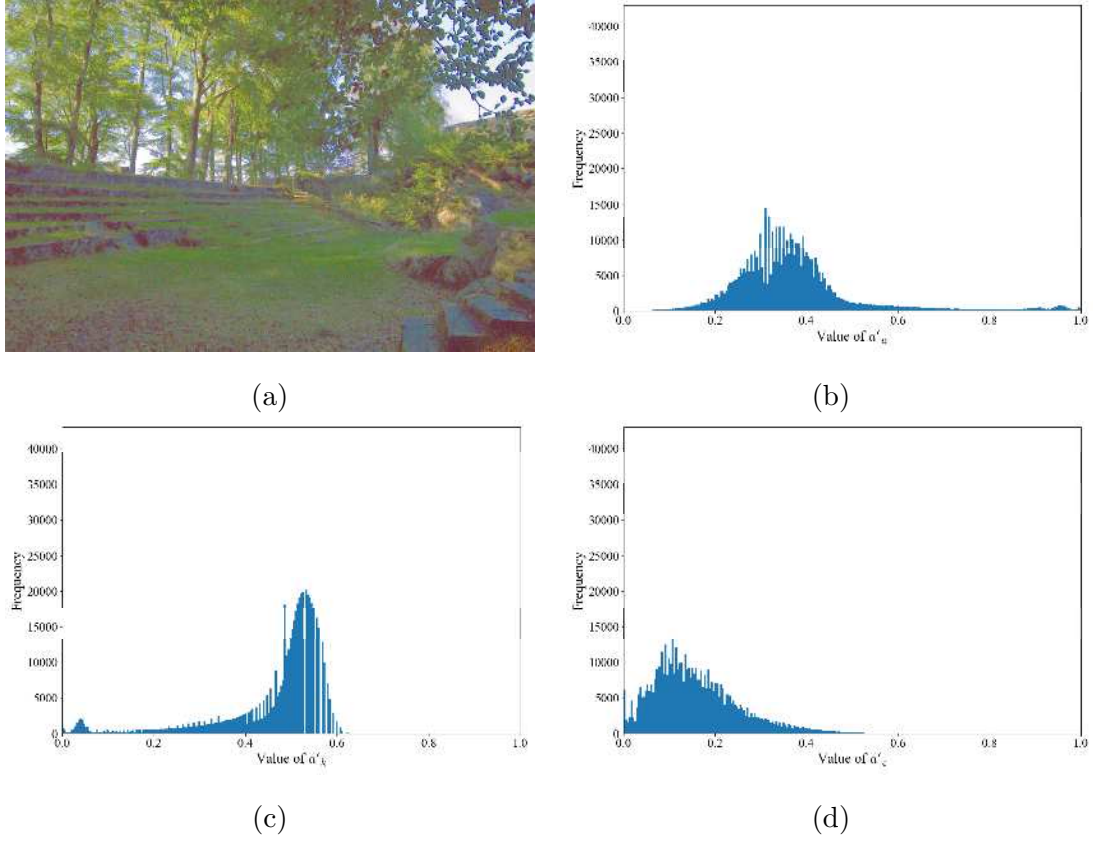


図 3.6: 修正ガンマ変換後の画像とその a'_w, a'_k, a'_c のヒストグラム. (a) 修正ガンマ変換後の画像, (b) a'_w のヒストグラム, (c) a'_k のヒストグラム, (d) a'_c のヒストグラム.

Fig. 3.6: An image obtained after applying a modified gamma transform and its histograms of a'_w, a'_k and a'_c . (a) Resultant image after modified gamma transform, (b) histogram of a'_w , (c) histogram of a'_k , (d) histogram of a'_c .

り, 以下の式で表される.

$$\delta(x/255, a'_k(i, j)) = \begin{cases} 1, & x/255 = a'_k(i, j), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.15)$$

次に, $h_{k'}$ に対して平滑化を行う. 平滑化はガンマ分布の関数に従うフィルタ係数によるフィルタ処理によって行われ, 以下のような式で表される.

$$h_{k', \sigma_{g_l}}(x) = \sum_{y=-z}^z G_{1D, l}(p_l + y) h_{k'}(x - y), \quad (3.16)$$

$$G_{1D, l}(p_l + y) = \frac{g_l(p_l + y)}{\sum_{y'=-z}^z g_l(p_l + y')}. \quad (3.17)$$

ここで, $z = \lceil 3\sigma_{g_l} \rceil$ である. フィルタ処理で用いられている $g_l(p_l + y')$ (ガンマ分布の関数) は以下の式で定義される.

$$g_l(x) = \begin{cases} \frac{x^{m-1} \exp(-x/\theta_l)}{\theta_l^m \Gamma(m)}, & x \geq 0, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.18)$$

ここで, m と θ_l はパラメータであり, $m > 0$, $\theta_l > 0$ である. $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数である. p_l はガンマ分布の関数の極大点であり, 以下のようにして求めることができる.

$$p_l = (m - 1)\theta_l. \quad (3.19)$$

また, ガンマ分布の関数の分散を σ^2 とする. 文献⁷¹ より, 以下のようにして求めることができる.

$$\sigma^2 = m\theta_l^2. \quad (3.20)$$

式 (3.20) より, θ_l は以下のように表すことができる.

$$\theta_l = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}. \quad (3.21)$$

式 (3.21) を用いることで, ガンマ分布の関数は m と σ をパラメータとすることができ, σ によって平滑化度合いを調節することができる. 図 3.7 にガンマ分布の関数のグラフを示す. 図 3.7(a) は $\sigma = 0.3$ と固定し, m を変化させたときのグラフである. 図 3.7(b) は $m = 2.5$ と固定し, σ を変化させたときのグラフである. 図 3.7(a) に示すように, m を変化させるとグラフの形状が変化している. m を小さくすると, 右裾が長くなる. 図 3.7(b) に示すように, σ を大きくすると, 分布が広がっていること分かる. ガンマ分布の関数は右裾に長い分布である. そのため, この関数をフィルタ係数としたフィルタ処理をヒストグラムに適用すると, 右に広げつつ, 平滑化が行われたような分布になる.

次に, ヒストグラム指定法においては, 以下のようにして $h_{k'}$ と $h_{k',\sigma_{g_l}}$ それぞれにおいて度数の総和で正規化されたヒストグラム (正規化ヒストグラム) を求める.

$$p_{k'}(x) = \frac{h_{k'}(x)}{\sum_{x'=0}^{255} h_{k'}(x')}, \quad (3.22)$$

$$p_{k',\sigma_{g_l}}(x) = \frac{h_{k',\sigma_{g_l}}(x)}{\sum_{x'=0}^{255} h_{k',\sigma_{g_l}}(x')}. \quad (3.23)$$

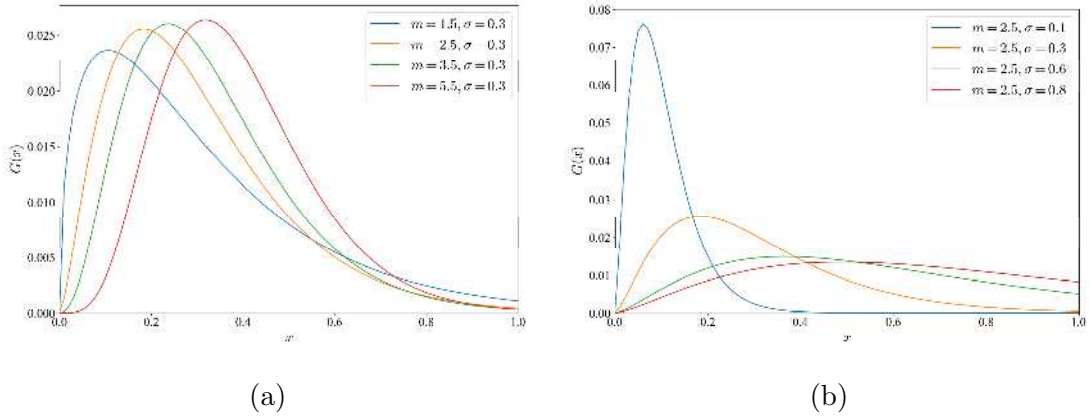


図 3.7: ガンマ分布の関数の形状. (a) m を変化させたときの効果, (b) σ を変化させたときの効果.

Fig. 3.7: The shapes of gamma distribution functions. (a) Effect of changing m , (b) effect of changing σ .

そして、画素値が x 以下の度数を累積したヒストグラム (正規化累積ヒストグラム) を以下の式で求める。

$$P_{k'}(x) = \sum_{x'=0}^x p_{k'}(x'), \quad (3.24)$$

$$P_{k', \sigma_{g_l}}(x) = \sum_{x'=0}^x p_{k', \sigma_{g_l}}(x'). \quad (3.25)$$

ヒストグラム指定法によって変換された値 $a_k''(i, j)$ は以下の式に従って求められる。

$$a_k''(i, j) = P_{k', \sigma_{g_l}}^{-1}(P_{k'}(a_k'(i, j))), \quad (3.26)$$

$$P_{k', \sigma_{g_l}}^{-1}(P_{k'}(a_k'(i, j))) = \min\{z | P_{k', \sigma_{g_l}}(z) \geq P_{k'}(a_k'(i, j))\}. \quad (3.27)$$

ここで、 $\min\{z | P_{k', \sigma_{g_l}}(z) \geq P_{k'}(a_k'(i, j))\}$ は $P_{k', \sigma_{g_l}}(z) \geq P_{k'}(a_k'(i, j))$ を満たす z の集合の内、その最小値を返す関数である。図 3.8 に $a_k''(i, j)$ を求める際の例を示す。図 3.8 の左のグラフが $P_{k'}(x)$ 、右のグラフが $P_{k', \sigma_{g_l}}(x)$ である。 $a_k''(i, j)$ は、 $a_k'(i, j)$ の $P_{k'}(x)$ から $P_{k', \sigma_{g_l}}(x)$ を参照することによって求められる。

図 3.9 にヒストグラム指定法で用いた $p_{k', \sigma_{g_l}}$ とヒストグラム指定法後の a_k'' のヒストグラムを示す。図 3.9(b) を見ると、中央に偏っていた分布が右裾の長い分布に変化している。

白、黒、純色の係数にはそれらの総和が 1 であるという制約があった (式 (2.8))。一方で、 $a_w'(i, j)$, $a_k''(i, j)$, $a_c'(i, j)$ の総和が 1 と等しいとは限らない。そのため、以下のような正規化

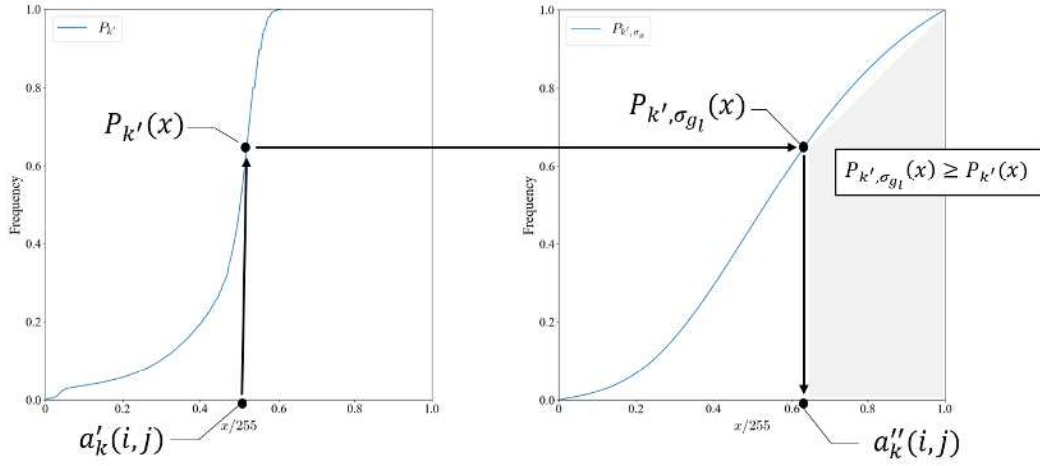


図 3.8: ヒストグラム指定法の概念図.

Fig. 3.8: A conceptual sketch of histogram specification.

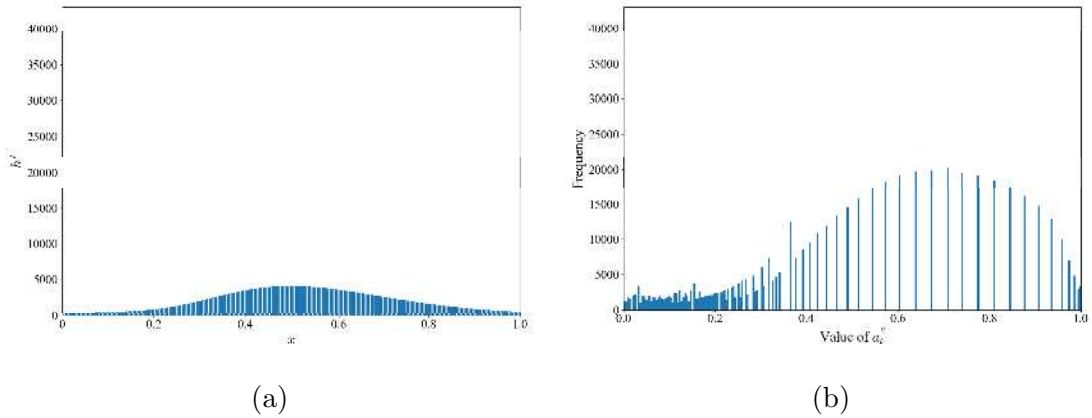


図 3.9: $p_{k', \sigma_{g_l}}$ と a_k'' のヒストグラム. (a) $p_{k', \sigma_{g_l}}$, (b) a_k'' のヒストグラム.

Fig. 3.9: $p_{k', \sigma_{g_l}}$ and histogram of a_k'' . (a) $p_{k', \sigma_{g_l}}$, (b) histogram of a_k'' .

処理を行う.

$$a_w''(i, j) = \frac{a_w'(i, j)}{a_w'(i, j) + a_k''(i, j) + a_c'(i, j)}, \quad (3.28)$$

$$a_k'''(i, j) = \frac{a_k''(i, j)}{a_w'(i, j) + a_k''(i, j) + a_c'(i, j)}, \quad (3.29)$$

$$a_c''(i, j) = \frac{a_c'(i, j)}{a_w'(i, j) + a_k''(i, j) + a_c'(i, j)}. \quad (3.30)$$

最終的な出力画素は以下によって求める.

$$O(i, j) = a_w''(i, j)\mathbf{w} + a_k'''(i, j)\mathbf{k} + a_c''(i, j)\mathbf{c}(i, j). \quad (3.31)$$

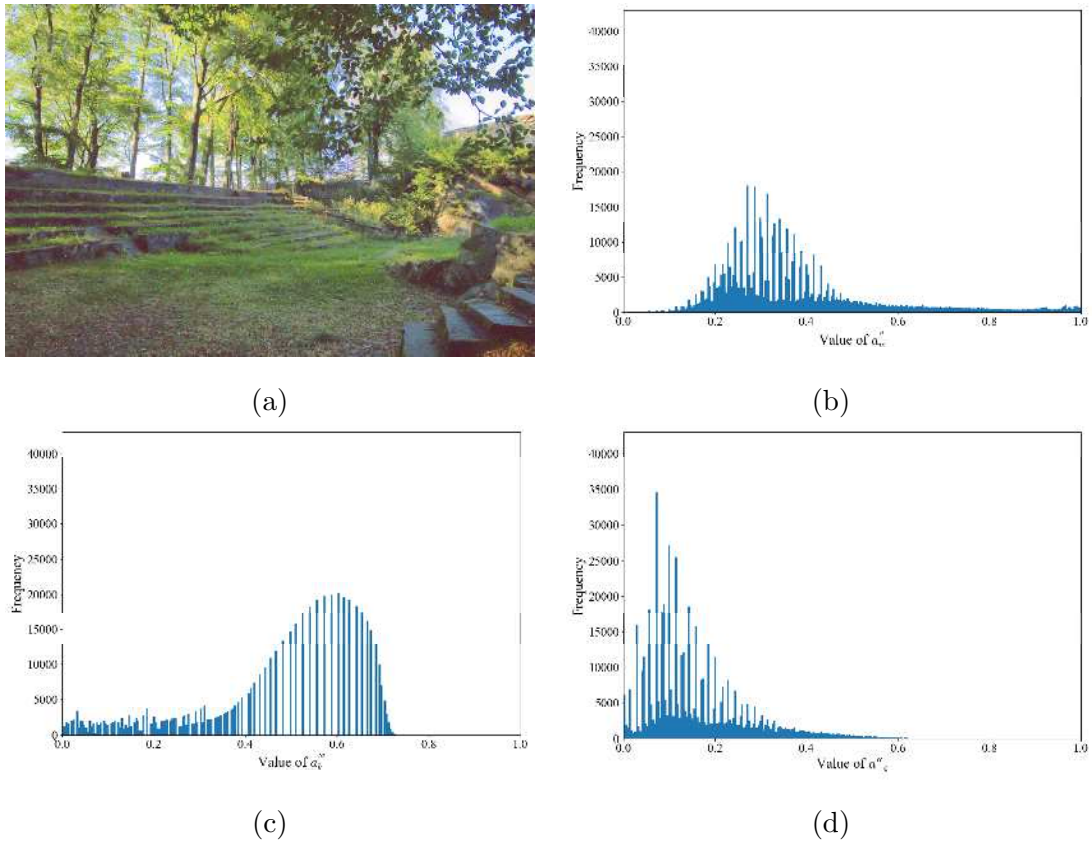


図 3.10: 提案手法適用後の画像とその a_w'' , a_k''' , a_c'' のヒストグラム. (a) 結果画像, (b) a_w'' のヒストグラム, (c) a_k''' のヒストグラム, (d) a_c'' のヒストグラム.

Fig. 3.10: An image obtained after applying the proposed method and its histograms of a_w'' , a_k''' and a_c'' . (a) Resultant image, (b) histogram of a_w'' , (c) histogram of a_k''' , (d) histogram of a_c'' .

図 3.10 に提案手法の出力画像の例を示す. 図 3.10(a) は図 3.1(a) に提案手法を適用した結果画像である. 図 3.10(b), (c), (d) はそれぞれ図 3.10(a) の a_w'' , a_k''' , a_c'' のヒストグラムである. 図 3.10(b) と (d) では図 3.6(b) と (d) からあまり分布は変わっていない. 一方で, 図 3.10(c) では, 図 3.6(c) から分布が広がっていることが分かる.

3.4 比較実験

3.4.1 実験準備

実験では、夜間や暗い室内のような様々なシーンを含めた低照度画像 200 枚を用いた。これらの画像はすべて長辺 900 画素の 24 ビットフルカラー画像であり、Flicker(<https://www.flicker.com/>) からダウンロードした。提案手法は X. Guo らの手法⁴²、Li らの手法⁴³、Jiang らの手法⁴⁷、C. Guo らの手法⁴⁸ と比較した。比較手法のパラメータは各文献に従い、設定した。提案手法のパラメータは以下のように設定した。 $\alpha = 3.2$, $\beta = 1.2$, $m = 2.5$, $\sigma = 0.58$.

3.4.2 主観評価

図 3.11 と図 3.12 に一つ目の各手法の結果画像の例を示す。図 3.12 は図 3.11 における赤枠の拡大図である。図 3.11(b)–(f) に示すように、いずれの手法もコントラストが高く、画像全体が明るくなっている。図 3.11(c) と (e) を見ると、Li らの手法と C. Guo らの手法では空でアーティファクトを引き起こしている。図 3.12(f) を見ると、提案手法は木で立体感のある見た目となり、良好な結果画像が得られていることが分かる。

図 3.13 に二つ目の各手法の結果画像の例を示す。図 3.13(c) と (e) に示すように、Li らの手法と C. Guo らの手法のコントラストは低い。一方で、図 3.13(b) と (f) を見ると、X. Guo らの手法と提案手法のコントラストは高い。図 3.13(d) の Jiang らの手法は地面や木の周辺などで不自然な色合いになっている。

3.4.3 定量評価

定量評価では、画像の評価指標である NIQMC (No-reference Image Quality Metric for Contrast distortion)⁷²、BIQME (Blind Image Quality Measure of Enhanced images)⁷³、LOE (Lightness Order Error)⁷⁴、HD (Hue Difference)^{65,75}、CR (Clipping Rate)⁷⁶、GRVE (Gradient Ratioing at Visible Edges)⁷⁶ を用いた。また、各手法の処理時間も算出した。

NIQMC は画像のコントラストを評価する指標である。NIQMC では、画像の詳細部についての局所的なコントラストと画像全体の大域的なコントラストを同時に評価する。NIQMC の値が大きいほど、画像のコントラストが高いことを示している。BIQME は画像のコントラストや明るさ、自然さを考慮した画質の総合評価指標である。BIQME の値が大きいほど画質が

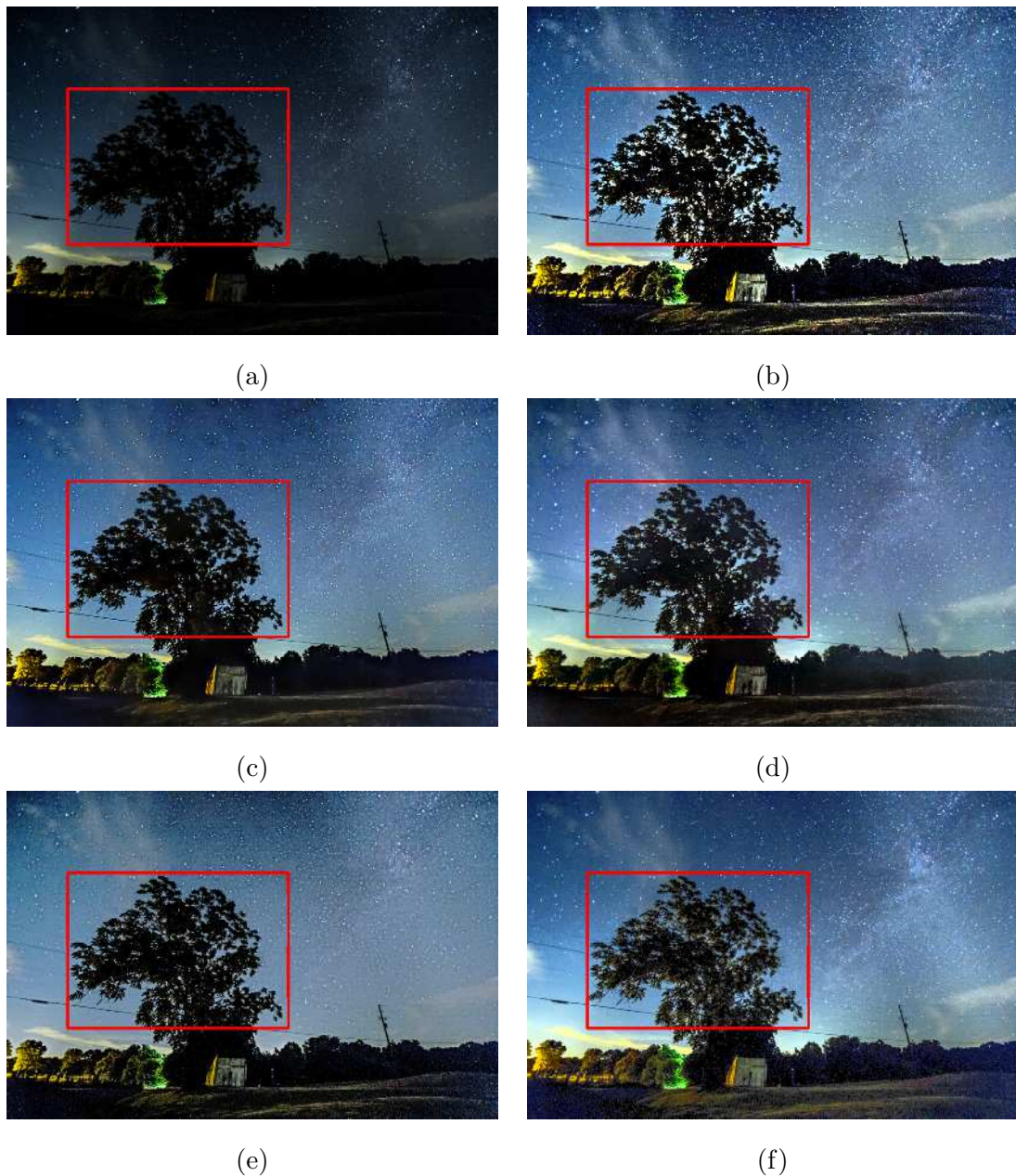


図 3.11: 1 枚目の結果画像. (a) 原画像, (b) X. Guo らの手法, (c) Li らの手法, (d) Jiang らの手法, (e) C. Guo らの手法, (f) 提案手法.

Fig. 3.11: The results of image1. (a) Original image, (b) X. Guo et al.'s method, (c) Li et al.'s method, (d) Jiang et al.'s method, (e) C. Guo et al.'s method, (f) proposed method.

良いことを示している. BIQME の文献⁷³によると, 低照度画像のみならず, ヘイズ画像や水中画像の画質改善への評価指標としての有効性が示されている.

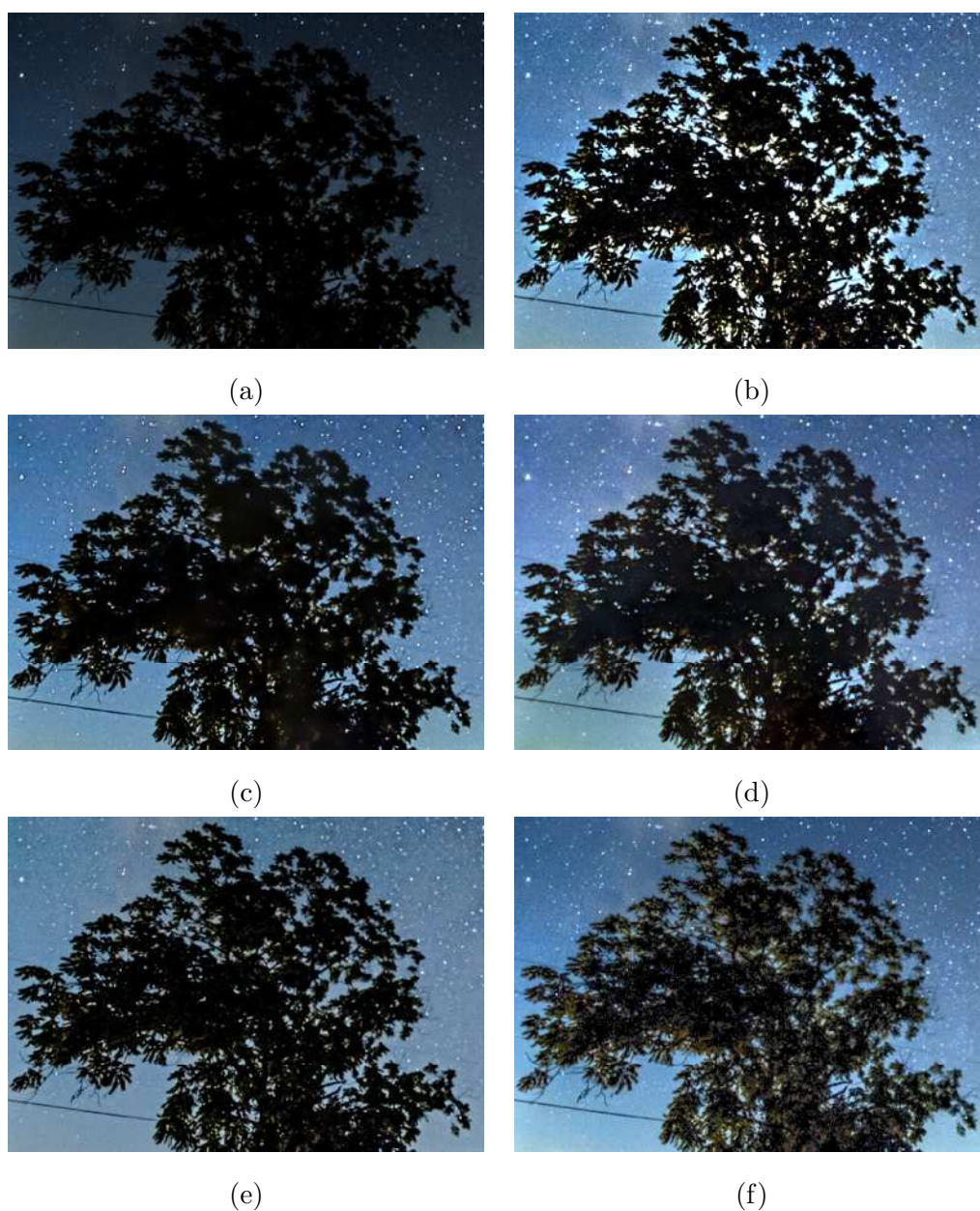


図 3.12: 1 枚目の結果の拡大図. (a) 原画像, (b) X. Guo らの手法, (c) Li らの手法, (d) Jiang らの手法, (e) C. Guo らの手法, (f) 提案手法.

Fig. 3.12: Enlarged images of the results of image 1. (a) Original image, (b) X. Guo et al.'s method, (c) Li et al.'s method, (d) Jiang et al.'s method, (e) C. Guo et al.'s method, (f) proposed method.

LOE は画像の自然さを評価する指標であり, 特に画像のアーティファクトに関して定量的に評価できる. LOE では入力画像と出力画像の明度の序列関係を計算する. LOE の定義は以

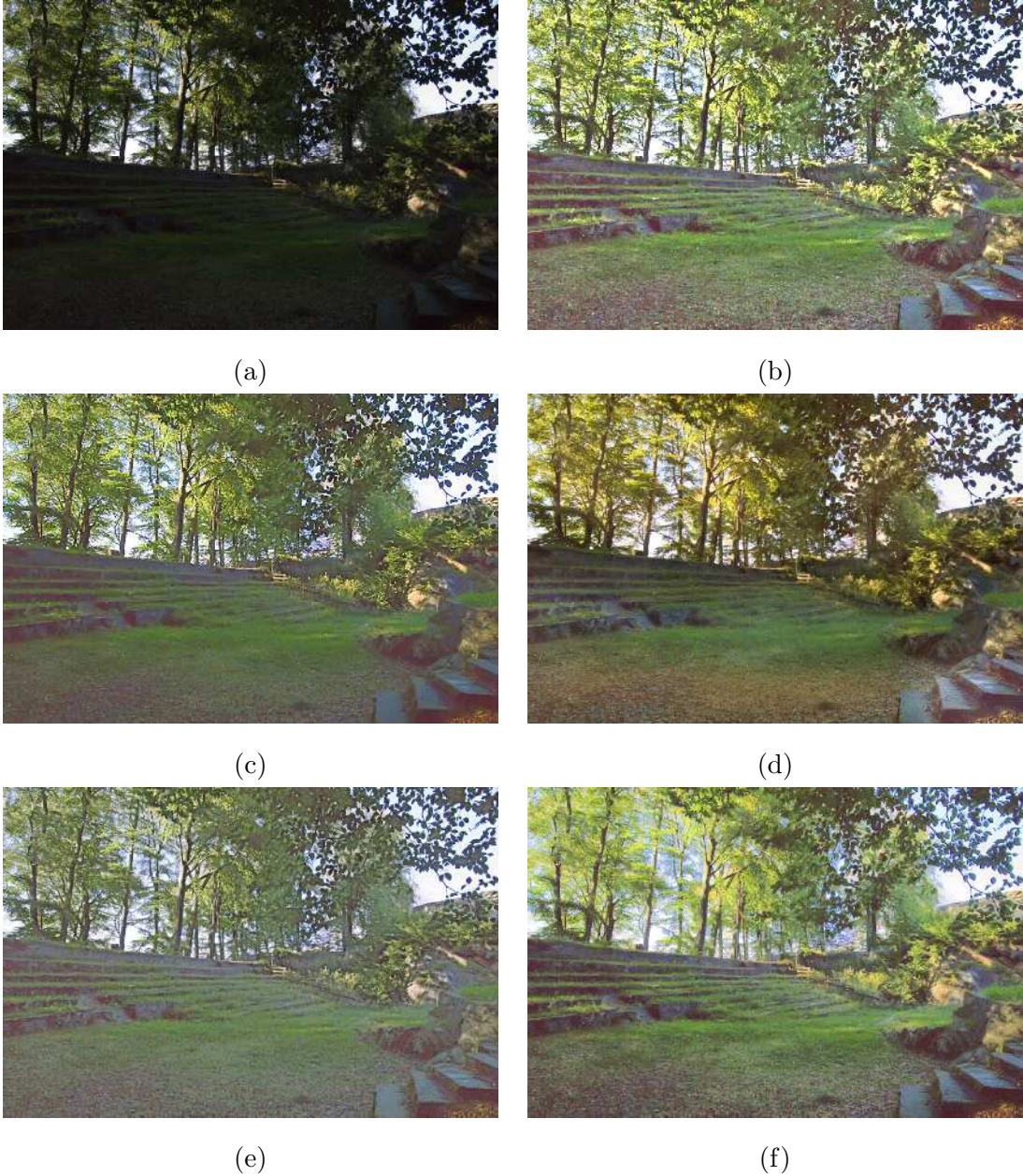


図 3.13: 2 枚目の結果画像. (a) 原画像, (b) X. Guo らの手法, (c) Li らの手法, (d) Jiang らの手法, (e) C. Guo らの手法, (f) 提案手法.

Fig. 3.13: The results of image 2. (a) Original image, (b) X. Guo et al.'s method, (c) Li et al.'s method, (d) Jiang et al.'s method, (e) C. Guo et al.'s method, (f) proposed method.

下の通りである⁷⁴.

$$\text{LOE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N U(V_I(i, j), V_I(k, l)) \oplus U(V_O(i, j), V_O(k, l)), \quad (3.32)$$

$$U(p, q) = \begin{cases} 1, & p \geq q, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.33)$$

ここで、 M と N はそれぞれ画像の縦と横の画素数である。 \oplus は排他的論理和である。 $V_I(i, j)$ と $V_O(i, j)$ はそれぞれ入力と出力画像の位置 (i, j) における RGB 成分の最大値である。LOE の値が小さいほど出力画像は自然な画像で、アーティファクトの発生が少ないことを示す。

HD は画像の自然な色合いを評価する指標である。HD においては入力画像と出力画像の色相の差を計算する。色相においては、計算方法が数多く提案されている。本論文では、Raines の色相と CIE-1976L*a*b*色空間における色相を用いた。Raines の色相による色相差は以下のように定義される⁷⁵。

$$\text{HD}_{\text{Raines}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left| e^{i' H_I(i, j)} - e^{i' H_O(i, j)} \right|, \quad (3.34)$$

$$H_I(i, j) = \tan^{-1} \left(\frac{I^G(i, j) - I^B(i, j)}{2I^R(i, j) - I^G(i, j) - I^B(i, j)} \right), \quad (3.35)$$

$$H_O(i, j) = \tan^{-1} \left(\frac{O^G(i, j) - O^B(i, j)}{2O^R(i, j) - O^G(i, j) - O^B(i, j)} \right). \quad (3.36)$$

ここで、 i' は虚数単位である。 $H_I(i, j)$ と $H_O(i, j)$ はそれぞれ入力と出力画像の位置 (i, j) における色相の値である。

CIE-1976L*a*b*色空間による色相差は以下で定義される⁶⁵。

$$\text{HD}_{\text{Lab}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\Delta E(i, j)^2 - \Delta L(i, j)^2 - \Delta C(i, j)^2}, \quad (3.37)$$

$$\Delta E(i, j) = \sqrt{\Delta L(i, j)^2 + \Delta a(i, j)^2 + \Delta b(i, j)^2}, \quad (3.38)$$

$$\Delta C(i, j) = \sqrt{a_I(i, j)^2 + b_I(i, j)^2} - \sqrt{a_O(i, j)^2 + b_O(i, j)^2}. \quad (3.39)$$

ここで、 $\Delta L(i, j) = L_I(i, j) - L_O(i, j)$, $\Delta a(i, j) = a_I(i, j) - a_O(i, j)$, $\Delta b(i, j) = b_I(i, j) - b_O(i, j)$ である。 $L_I(i, j)$, $a_I(i, j)$, $b_I(i, j)$ はそれぞれ入力画像 I の位置 (i, j) における L^* , a^* , b^* の値である。 $L_O(i, j)$, $a_O(i, j)$, $b_O(i, j)$ はそれぞれ出力画像 O の位置 (i, j) における L^* , a^* , b^* の画素値である。RGB 色空間から CIE-1976L*a*b*色空間への変換は付録 2.A に記す。HD の値が小さいほど出力画像は自然な色合いである。

CR は出力画像の白つぶれ、黒つぶれの画素数を評価する指標であり、特に画像の過強調について評価することができる。CR の定義は以下の通りである⁷⁶。

$$\text{CR} = \frac{n_s}{MN}. \quad (3.40)$$

ここで, n_s は処理結果後の画素が黒もしくは白になった画素の数である. CR の値が大きいほど出力画像は白つぶれや黒つぶれの数が多い. GRVE は画像の視認性を評価する指標である. GRVE では, 入力と出力画像の間で見えるようになったエッジの数を評価する. GRVE の定義は以下の通りである⁷⁶.

$$\text{GRVE} = \exp \left(\frac{1}{N_Q} \sum_{(i,j) \in Q} \log \frac{dV_O(i,j)}{dV_I(i,j)} \right), \quad (3.41)$$

$$Q = \left\{ (i,j) \mid C(i,j,s_0) > 255 \frac{p_t}{100} \right\}, \quad (3.42)$$

$$s_0 = \arg \max_{s \in \{0,1,\dots,255\}} C(i,j,s), \quad (3.43)$$

$$C(i,j,s) = \frac{1}{(2r_\psi + 1)^2} \sum_{k=-r_\psi}^{r_\psi} \sum_{l=-r_\psi}^{r_\psi} \min \left[\frac{|s - V_I(i,j)|}{\max[s, V_I(i,j)]}, \frac{|s - V_I(k,l)|}{\max[s, V_I(k,l)]} \right], \quad (3.44)$$

$$dV_O(i,j) = \sqrt{\left(\sum_{d \in \{h,v\}} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 g_d(k,l) V_O(i+k, j+l) \right)^2}, \quad (3.45)$$

$$dV_I(i,j) = \sqrt{\left(\sum_{d \in \{h,v\}} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 g_d(k,l) V_I(i+k, j+l) \right)^2}, \quad (3.46)$$

$$g_v = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}, \quad (3.47)$$

$$g_h = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (3.48)$$

ここで, $\max[\cdot]$, $\min[\cdot]$ はそれぞれ最大値関数, 最小値関数である. N_Q は Q の要素数である. p_t と r_ψ はパラメータであり, GRVE の文献⁷⁶によるとそれぞれ 2.5 と 3 と設定されている. $dV_O(i,j)$, $dV_I(i,j)$ はそれぞれ微分フィルタによって計算された $V_O(i,j)$, $V_I(i,j)$ の勾配値である. $V_I(i,j)$ と $V_O(i,j)$ はそれぞれ入力と出力画像の位置 (i,j) における RGB 成分の最大値である. GRVE の値が大きいほど, 出力画像の視認性は良いことを示す.

処理時間を算出するにあたって, いずれの手法も以下の計算機の実行した. CPU が Intel[®]Core[™] i9-10900 2.8GHz, メモリが 32.0GB, GPU が Nvidia Quadro RTX 4000 である.

表 3.1: NIQMC と BIQME を用いた定量評価 (実験画像 200 枚の平均値).

Table 3.1: Quantitative evaluation using NIQMC and BIQME (the average score of 200 tested images).

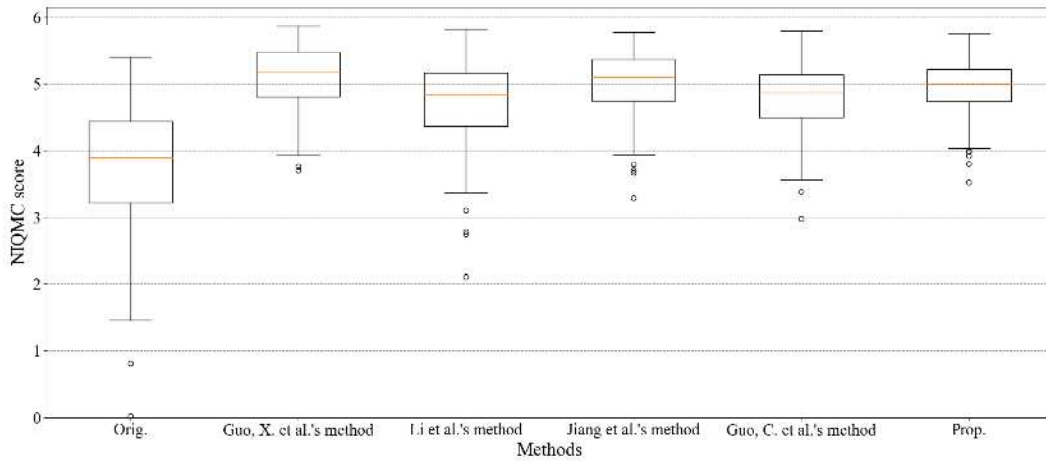
	NIQMC	BIQME
原画像	3.77	0.3235
X. Guo らの手法	5.12	0.5707
Li らの手法	4.74	0.5526
Jiang らの手法	5.01	0.5706
C. Guo らの手法	4.81	0.5215
提案手法	4.94	0.5619

表 3.1 に実験画像 200 枚の NIQMC と BIQME の平均値を示す。NIQMC と BIQME の平均値が最も大きくなった手法は X. Guo らの手法であった。図 3.14 に NIQMC と BIQME の箱ひげ図を示す。図 3.14(a) の NIQMC と図 3.14(b) の BIQME で示すように、提案手法の値は高い傾向にある。提案手法は X. Guo らの手法と比べても大きな差はなく、十分に画質の改善が行われていることが示されている。

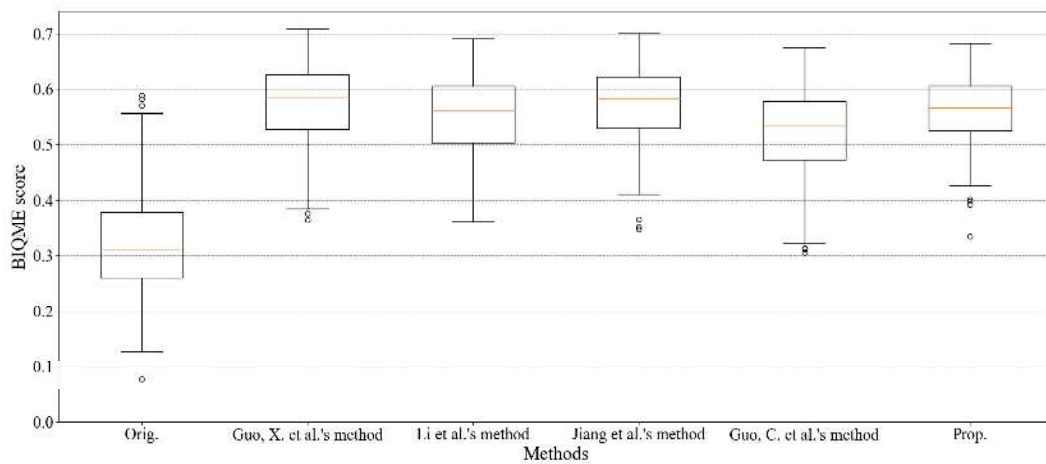
表 3.2 に実験画像 200 枚の HD_{Raines} と HD_{Lab} の平均値を示す。 HD_{Raines} の提案手法の値は 0 であり、提案手法は色相を保存する手法であることが確認できる。深層学習に基づく手法である Jiang らの手法および C. Guo らの手法は両方の指標で値が大きく、色相が大きく変わっていることが示されている。提案手法は HD_{Lab} においても最も小さい値となった。

表 3.3 に実験画像 200 枚の LOE, CR, GRVE の平均値を示す。LOE が最も小さい値となった手法は提案手法であった。CR で最も小さい値となった手法は Li らの手法であった。しかし、Li らの手法は GRVE や NIQMC の値が小さい。つまり、Li らの手法は視認性やコントラストが低いことが示されている。提案手法の CR は 2 番目に小さい値であった。さらに、提案手法の GRVE は 2 番目に大きい。GRVE が最も大きい値となった手法は X. Guo らの手法であった。しかし、X. Guo らの手法は CR の値が大きく、白つぶれや黒つぶれを引き起こしていることが示されている。

表 3.4 に処理時間の平均値を示す。C. Guo らの手法が最も高速な結果となった。C. Guo らの手法と Jiang らの手法は深層学習に基づく手法であり、GPU によって高速計算が行われている。一方で、X. Guo らの手法、Li らの手法、提案手法は CPU で計算している。CPU を用いた手法の中では提案手法が最も高速であった。



(a)



(b)

図 3.14: NIQMC と BIQME の箱ひげ図. (a) NIQMC, (b) BIQME.

Fig. 3.14: Boxplots of NIQMC and BIQME. (a) NIQMC, (b) BIQME.

3.5 結言

本章では、画像の色相を保ちつつ低照度画像の視認性を改善する手法について説明した。その手法では、白と純色の係数に対して修正ガンマ変換を適用することで画像に視認性を改善した。さらに、黒の係数のヒストグラムをガンマ分布の関数に従うフィルタで平滑化することで、画像のコントラストを改善した。実験では主観評価と定量評価を通じて、提案手法は自然な色合いで過強調を引き起こすことなく、視認性が十分に改善することを確認した。

表 3.2: HD を用いた定量評価 (実験画像 200 枚の平均値).

Table 3.2: Quantitative evaluation using HD (the average score of 200 tested images).

	Raines	CIE1976 L*a*b*
X. Guo らの手法	0.02	0.68
Li らの手法	0.17	1.16
Jiang らの手法	0.30	2.26
C. Guo らの手法	0.21	1.60
提案手法	0	0.59

表 3.3: LOE, CR, GRVE を用いた定量評価 (実験画像 200 枚の平均値).

Table 3.3: Quantitative evaluation using LOE, CR and GRVE (the average score of 200 tested images).

	LOE	CR	GRVE
X. Guo らの手法	1144.5	4.63×10^{-2}	4.91
Li らの手法	1205.0	1.17×10^{-2}	2.08
Jiang らの手法	2053.8	3.56×10^{-2}	3.48
C. Guo らの手法	840.4	3.59×10^{-2}	3.75
提案手法	269.2	3.44×10^{-2}	4.37

表 3.4: 処理時間実験 (画像 200 枚の平均値).

Table 3.4: Processing time (the average score of 200 tested images).

	処理時間 (秒)	計算リソース
X. Guo らの手法	1.20	CPU
Li らの手法	26.58	CPU
Jiang らの手法	0.06	GPU
C. Guo らの手法	0.02	GPU
提案手法	0.08	CPU

第4章 不鮮明な画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調法

4.1 緒言

本章では，不鮮明な画像に対する RGB 色空間の等色相アンシャープマスキング法について述べる．不鮮明な画像に対する従来の画像強調法としては，アンシャープマスキングがある．アンシャープマスキングは効果的に画像の詳細部を強調することができるが，RGB 各成分に処理を適用するため，色相を保存できないという問題点がある．本論文では色域を保証し，色相を保存した上で，アンシャープマスキングによる詳細部強調の効果を保持した手法について述べる．

4.2 節では，不鮮明度画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調手法である提案手法について説明する．提案手法では RGB 各成分にアンシャープマスキングを適用し，これを RGB 色空間における等色相条件を満たす線形変換式で近似する．次に，RGB 色空間の色域から逸脱した画素を RGB 色空間の等色相平面内に収める処理を行う．4.3 節は比較実験である．比較実験では，提案手法と従来手法との比較実験により提案手法の有効性を明らかにする．さらに，線形近似する方法や鮮鋭化係数を変えることによる効果についても示す．4.4 節では，本章を総括する．

4.2 不鮮明度画像に対する RGB 色空間の等色相平面における画像強調手法

提案手法では，以下の式によってアンシャープマスキングを施す．

$$I^c(i, j) = I^c(i, j) + \alpha_u(I^c(i, j) - G_u^c(i, j)), \quad (4.1)$$

$$G_u^c(i, j) = \sum_{k=-r_u}^{r_u} \sum_{l=-r_u}^{r_u} G_{2D}(k, l) I^c(i+k, j+l), \quad (4.2)$$

$$G_{2D}(k, l) = \frac{\exp(-(k^2 + l^2)/(2\sigma_u^2))}{\sum_{k'=-r_u}^{r_u} \sum_{l'=-r_u}^{r_u} \exp(-(k'^2 + l'^2)/(2\sigma_u^2))}. \quad (4.3)$$

ここで、 α_u は詳細成分の強調効果を調節するパラメータである。 σ_u はガウシアンフィルタの標準偏差のパラメータである。 r_u はフィルタサイズを決めるパラメータであり、 σ_u に基づき $r_u = \lceil 3\sigma_u \rceil$ である。

$I^c(i, j)$ を Naik と Murthy の色相保存の条件式 (式 (2.2)) で近似する³¹。提案手法では、以下のようなコスト関数を考える。

$$E(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j) - (A(i, j)I^c(i, j) + B(i, j)))^2. \quad (4.4)$$

式 (4.4) は以下の式を満たす。

$$\frac{\partial E(i, j)}{\partial A(i, j)} = 0, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial E(i, j)}{\partial B(i, j)} = 0. \quad (4.6)$$

したがって、式 (4.4) を最小化するような $A(i, j)$ と $B(i, j)$ は以下のようにして求めることができる。式 (4.7), (4.8) の導出は付録 4.A に記す。

$$A(i, j) = \frac{s_{\mathbf{I}, \mathbf{I}'}(i, j)}{\sigma_{\mathbf{I}}^2(i, j)}, \quad (4.7)$$

$$B(i, j) = \bar{I}(i, j) - A(i, j)\bar{I}(i, j), \quad (4.8)$$

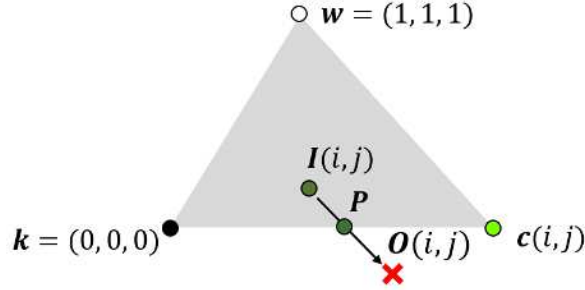
$$s_{\mathbf{I}, \mathbf{I}'}(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j)I'^c(i, j)) - \bar{I}(i, j)\bar{I}'(i, j), \quad (4.9)$$

$$\sigma_{\mathbf{I}}^2(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} ((I^c(i, j))^2) - \bar{I}(i, j)^2, \quad (4.10)$$

$$\bar{I}(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \quad (4.11)$$

$$\bar{I}'(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I'^c(i, j). \quad (4.12)$$

ここで、Naik と Murthy の色相保存の条件式より $A(i, j) < 0$ の場合、 $A(i, j) = 0$ とする。 $s_{\mathbf{I}, \mathbf{I}'}(i, j)$ は $\mathbf{I}(i, j)$ と $\mathbf{I}'(i, j)$ の RGB 成分の共分散である。 $\sigma_{\mathbf{I}}^2(i, j)$ は $\mathbf{I}(i, j)$ の RGB 成分の分散である。 $\bar{I}(i, j)$ と $\bar{I}'(i, j)$ はそれぞれ $\mathbf{I}(i, j)$ と $\mathbf{I}'(i, j)$ の RGB 成分の平均値である。求めた $A(i, j)$, $B(i, j)$ を用いて、式 (2.2) より出力値 $\mathbf{O}(i, j)$ を求める。しかし、 $\mathbf{O}(i, j)$ は RGB

図 4.1: $O(i, j)$ の等色相平面.Fig. 4.1: Equi-hue plane of $O(i, j)$.

色空間の色域外の値になっている場合がある．一方で， $O(i, j)$ は黒 k ，白 w ，純色 $c(i, j)$ (もしくは，入力画素 $I(i, j)$) と同一平面上にある (付録 4.B 参照)．

図 4.1 に $O(i, j)$ が RGB 色空間の色域外にある場合の等色相平面の例を示す．図 4.1 に示すように $I(i, j)$ と $O(i, j)$ を通る直線を考えて， k と $c(i, j)$ を通る辺と交わる． $O(i, j)$ は黒 k ，白 w ，純色 $c(i, j)$ と同一平面上にあるため， $I(i, j)$ と $O(i, j)$ を通る直線考えたとき，RGB 色空間の等色相平面を構成する辺との交点が存在する．提案手法では $O(i, j)$ が色域外にある場合，その交点を色域に収めた画素として出力する．ここで， $\overline{kc(i, j)}$ を k と $c(i, j)$ を結ぶ直線， $\overline{I(i, j)O(i, j)}$ を $I(i, j)$ と $O(i, j)$ を結ぶ直線とする．このとき， $\overline{kc(i, j)}$ 上にある任意の点を $P_{k,c}(i, j)$ とすると，以下のように表される．

$$P_{k,c}(i, j) = k + s_{k,c}(i, j)(c(i, j) - k). \quad (4.13)$$

ここで， $s_{k,c}(i, j)$ の値によって点 $P_{k,c}(i, j)$ の位置は以下ようになる．

$$\begin{cases} s_{k,c}(i, j) < 0, & k \text{ と } c(i, j) \text{ を結ぶ線分の外 (} k \text{ 側),} \\ s_{k,c}(i, j) = 0, & \text{点 } k, \\ 0 < s_{k,c}(i, j) < 1, & k \text{ と } c(i, j) \text{ を結ぶ線分の上,} \\ s_{k,c}(i, j) = 1, & \text{点 } c(i, j), \\ s_{k,c}(i, j) > 1, & k \text{ と } c(i, j) \text{ を結ぶ線分の外 (} c(i, j) \text{ 側).} \end{cases} \quad (4.14)$$

図 4.2(a) に RGB 色空間の等色相平面における k と $c(i, j)$ を結ぶ直線とその直線上にある点の例を示す．図 4.2(a) の点線が $\overline{kc(i, j)}$ である．もし， $s_{k,c}(i, j) < 0$ や $s_{k,c}(i, j) > 1$ であれば， $P_{k,c}(i, j)$ は RGB 色空間の等色相平面の外に位置する． $\overline{I(i, j)O(i, j)}$ 上にある任意の点

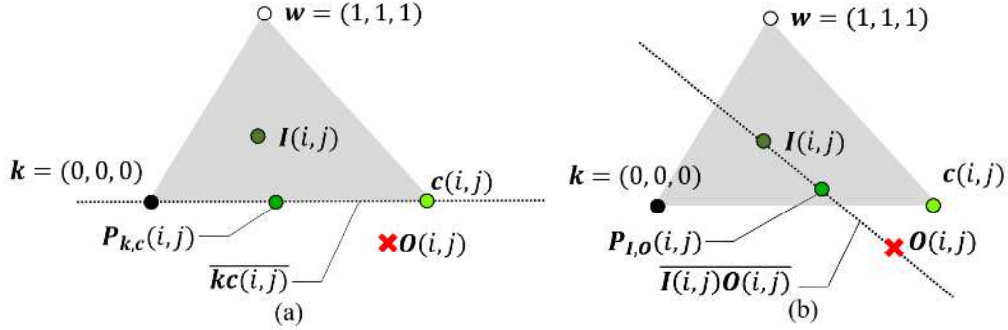


図 4.2: $\overline{kc(i, j)}$ と $\overline{I(i, j)O(i, j)}$. (a) $\overline{kc(i, j)}$, (b) $\overline{I(i, j)O(i, j)}$.

Fig. 4.2: $\overline{kc(i, j)}$ and $\overline{I(i, j)O(i, j)}$. (a) $\overline{kc(i, j)}$, (b) $\overline{I(i, j)O(i, j)}$.

を $P_{I,O}(i, j)$ とすると, 以下のように表される.

$$P_{I,O}(i, j) = I(i, j) + s_{I,O}(i, j)(O(i, j) - I(i, j)). \quad (4.15)$$

ここで, $s_{I,O}(i, j)$ による点 $P_{I,O}(i, j)$ の位置は式 (4.14) と同じような関係にある. 図 4.2(b) に RGB 色空間の等色相平面における $I(i, j)$ と $O(i, j)$ を結ぶ直線とその直線上にある点の例を示す. 図 4.2(b) の点線が $\overline{I(i, j)O(i, j)}$ である. $s_{I,O}(i, j)$ については, $s_{k,c}(i, j)$ と同じ事が言える. したがって, RGB 色空間の等色相平面に収めるためには, $s_{k,c}(i, j)$ と $s_{I,O}(i, j)$ はそれぞれ $0 \leq s_{k,c}(i, j) \leq 1$ と $0 \leq s_{I,O}(i, j) \leq 1$ という条件がある. 交点では, $P_{k,c}(i, j) = P_{I,O}(i, j)$ が成り立つので,

$$\mathbf{k} + s_{k,c}(i, j)(\mathbf{c}(i, j) - \mathbf{k}) = I(i, j) + s_{I,O}(i, j)(O(i, j) - I(i, j)), \quad (4.16)$$

となる. 文献⁷⁷を参考に, $\mathbf{c}(i, j) - \mathbf{k} = \mathbf{d}_1(i, j)$, $O(i, j) - I(i, j) = \mathbf{d}_2(i, j)$ とすると, 以下のように $s_{k,c}(i, j)$ と $s_{I,O}(i, j)$ を求めることができる. 式 (4.17), (4.18) の導出は付録 4.C に記す.

$$s_{k,c}(i, j) = \frac{((I(i, j) - \mathbf{k}) \times \mathbf{d}_2(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j))}{(\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j))}, \quad (4.17)$$

$$s_{I,O}(i, j) = \frac{((\mathbf{k} - I(i, j)) \times \mathbf{d}_1(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j))}{(\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j))}. \quad (4.18)$$

ここで, \cdot と \times はそれぞれ内積と外積の演算子である.

$0 \leq s_{k,c}(i, j) \leq 1$ と $0 \leq s_{I,O}(i, j) \leq 1$ を満たすとき, 求めた $s_{I,O}(i, j)$ を用いて以下の式で色域に収めた出力値を得る.

$$O'(i, j) = I(i, j) + s_{I,O}(i, j)(O(i, j) - I(i, j)). \quad (4.19)$$

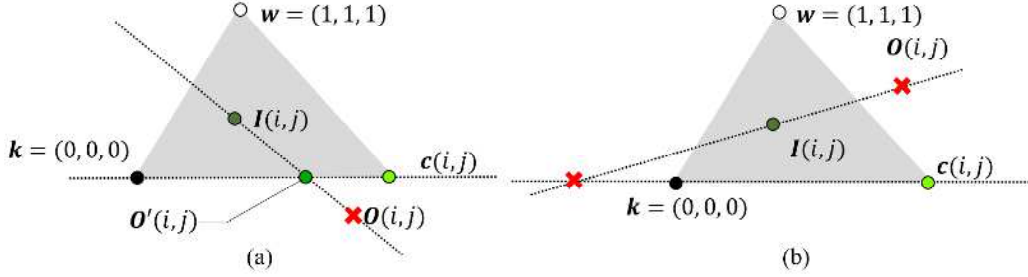


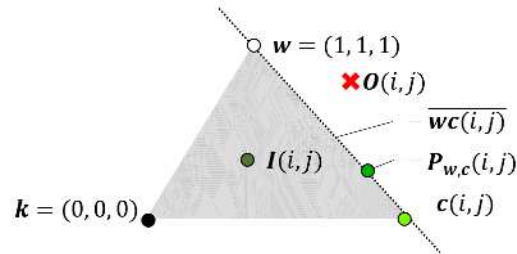
図 4.3: $O'(i, j)$ と色域外における交点. (a) $O(i, j)$, (b) $s_{k,c}(i, j) < 0$, $s_{I,O}(i, j) < 0$.

Fig. 4.3: $O'(i, j)$ and a crossing point in out-of-gamut. (a) $O(i, j)$, (b) $s_{k,c}(i, j) < 0$, $s_{I,O}(i, j) < 0$.

図 4.3(a) に RGB 色空間の等色相平面における $O'(i, j)$ の例を示す. $O'(i, j)$ は RGB 色空間の等色相平面内に位置する. 一方, 求めた $s_{k,c}(i, j)$, $s_{I,O}(i, j)$ のいずれかが $0 \leq s_{k,I}(i, j) \leq 1$, $0 \leq s_{I,O}(i, j) \leq 1$ を満たさない場合がある. 図 4.3(b) に $s_{k,c}(i, j) < 0$, $s_{I,O}(i, j) < 0$ の例を示す. このとき, 交点は RGB 色空間の等色相平面から外れた箇所で交点を持つ. したがって, RGB 色空間の色域に収まっていない. $s_{k,c}(i, j)$, $s_{I,O}(i, j)$ のいずれかが $0 \leq s_{k,I}(i, j) \leq 1$, $0 \leq s_{I,O}(i, j) \leq 1$ を満たさない場合, $\overline{I(i, j)O(i, j)}$ は w と $c(i, j)$ を通る直線と交点を持つと仮定する. ここで, $\overline{wc(i, j)}$ を w と $c(i, j)$ を結ぶ直線とする. このとき, $\overline{wc(i, j)}$ 上にある任意の点を $P_{w,c}(i, j)$ とすると, 以下のように表される.

$$P_{w,c}(i, j) = w + s_{w,c}(i, j)(c(i, j) - w). \quad (4.20)$$

ここで, $s_{w,c}(i, j)$ による点 $P_{w,c}(i, j)$ の位置は式 (4.14) と同じような関係にある. 図 4.4 に RGB 色空間の等色相平面における w と $c(i, j)$ を結ぶ直線とその直線上にある点の例を示す. 図 4.4 の点線が $\overline{wc(i, j)}$ である. $s_{w,c}(i, j)$ については, $s_{k,c}(i, j)$ と同じ事が言える. $\overline{I(i, j)O(i, j)}$ と $\overline{wc(i, j)}$ の交点については式 (4.16)–(4.18) における k を w に変えることで, $s_{w,c}(i, j)$, $s_{I,O}(i, j)$ が求まる. 求めた $s_{w,c}(i, j)$, $s_{I,O}(i, j)$ がそれぞれ $0 \leq s_{w,c}(i, j) \leq 1$, $0 \leq s_{I,O}(i, j) \leq 1$ であれば, 式 (4.19) を計算し, 色域に収めた出力値を得る.

図 4.4: $\overline{wc}(i, j)$.Fig. 4.4: $\overline{wc}(i, j)$.

4.3 比較実験

4.3.1 実験準備

実験では, SIDBA(12枚)⁷⁸, NASA(22枚)⁷⁹, Kodak(25枚)⁸⁰のデータセットを用いた. これらの画像はすべて24ビットフルカラー画像である. 提案手法は一般的なアンシャープマスクリング法, Kouらの手法⁵⁵, Xieらの手法⁵⁹, YuとUrahamaの手法⁵⁶と比較した. 各手法のパラメータは文献に従って設定した. 一般的なアンシャープマスクリング法と提案手法のパラメータでは, Kouらの手法とXieらの手法に従い r_u , σ_u , α_u をそれぞれ15, 5, 1とした.

4.3.2 主観評価

図4.5と図4.6に一つ目の各手法の結果画像の例を示す. 図4.6は図4.5における緑枠の拡大図である. 図4.5(b), (d), (f)に示すように, 一般的なアンシャープマスクリング法, Xieらの手法, 提案手法は画像の輪郭を強調していることが分かる. 図4.6(e)のYuとUrahamaの手法はスカーフの輪郭がなまっている. 図4.5(c)と図4.6(c)のKouらの手法は多くの詳細部を強調することができるが, ざらついたような印象がある.

図4.7と図4.8に二つ目の各手法の結果画像の例を示す. 図4.8は図4.7における緑枠の拡大図である. 図4.7(c)に示すように, Kouらの手法における結果画像では多く詳細部が強調されている. 一方で, 図4.7(e)のYuとUrahamaの手法は鮮鋭化の効果が弱いように見える. 図4.7(b), (d), (f)を見るとXieらの手法における結果画像の輪郭は一般的なアンシャープマスクリング法や提案手法における結果画像の輪郭を比べると, 鮮鋭化の効果が弱いように見える.

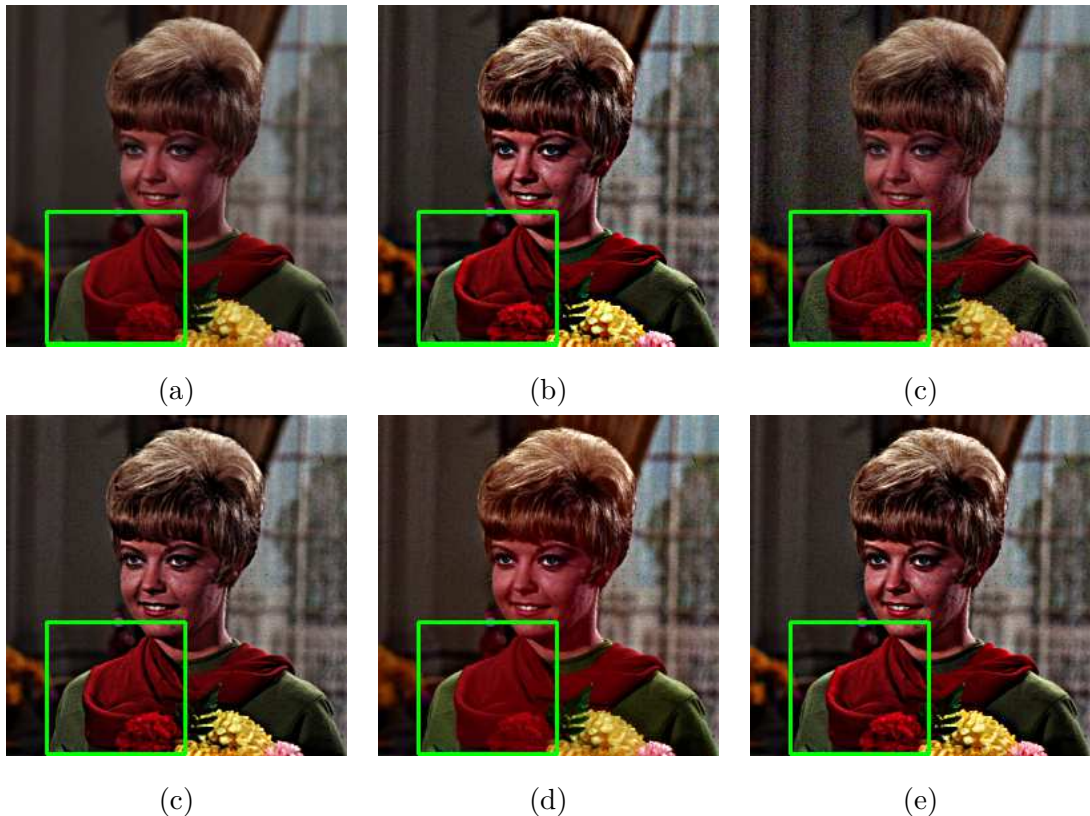


図 4.5: 1 枚目の結果画像. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスキング法, (c) Kou らの手法, (d) Xie らの手法, (e) Yu と Urahama の手法, (f) 提案手法.

Fig. 4.5: The results of image 1. (a) Original image, (b) general unsharp masking method, (c) Kou et al.'s method, (d) Xie et al.'s method, (e) Yu and Urahama's method, (f) proposed method.

4.3.3 定量評価

定量評価では, HD (Hue Difference) と GRVE (Gradient Ratioing at Visible Edges)⁷⁶ を用いた. 各評価指標の説明と定義は 3.4.3 節で述べたものと同様である.

表 4.1 にすべてのデータセット (全 59 枚) に対する HD_{Raines} , HD_{Lab} , GRVE の平均値を示す. HD_{Raines} の提案手法の値は 0 であり, 提案手法は色相を保存する手法であることが確認できる. 一般的なアンシャープマスキング法と Kou らの手法は HD_{Raines} と HD_{Lab} の値が大きく, 色相が大きく変わっていることが示されている. その一方で, これらの手法は GRVE の値が大きい. これは画像の鮮鋭化の効果が大きくなっていることを示している. 提案手法の GRVE の値は一般的なアンシャープマスキング法の GRVE と同程度である. さらに HD_{Raines}

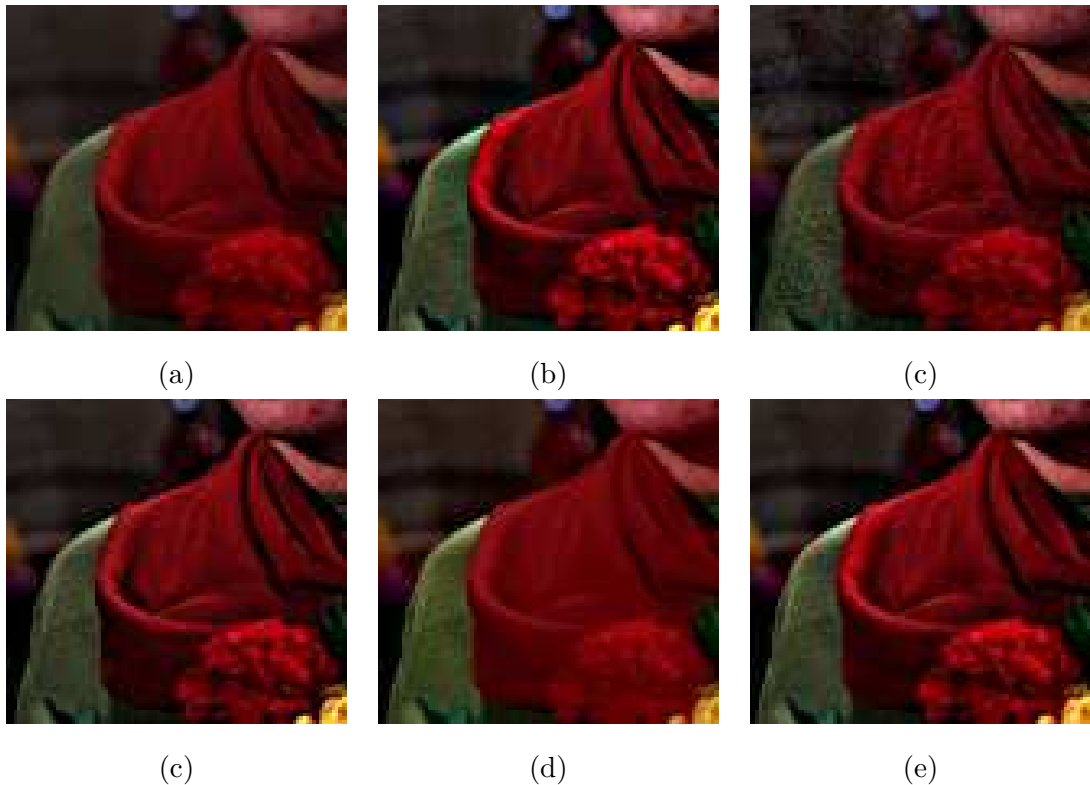


図 4.6: 1 枚目の結果の拡大図. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスクング法, (c) Kou らの手法, (d) Xie らの手法, (e) Yu と Urahama の手法, (f) 提案手法.

Fig. 4.6: Enlarged images of the results of image 1. (a) Original image, (b) general unsharp masking method, (c) Kou et al.'s method, (d) Xie et al.'s method, (e) Yu and Urahama's method, (f) proposed method.

と HD_{Lab} が小さい傾向にある. 小松原の研究によると, HD_{Lab} が 0.39 よりも大きくなるとヒトが色差を感じる確率が高くなることが報告されている⁸¹. 表 4.1 を見ると, Xie らの手法と提案手法は HD_{Lab} が 0.39 よりも小さく, 良好な結果であることが示されている.

4.3.4 I^c の変化による処理結果の変化

提案手法は鮮鋭化した画像 I^c を $A(i, j)I^c + B(i, j)$ に近似する手法である. これにより, 入力画像の色相を保ちつつ, 画像の鮮鋭化の効果を得ることができる. さらに, 提案手法はどのような鮮鋭化手法で得られた画像でも I^c として用いることができる. ここでは, I^c を Kou らの手法⁵⁵ や Son らの手法⁶² にしたときの結果を示す.

図 4.9(d) と図 4.10(d) に $I^c(i, j)$ を Kou らの手法の出力値にした場合の結果画像の一例を

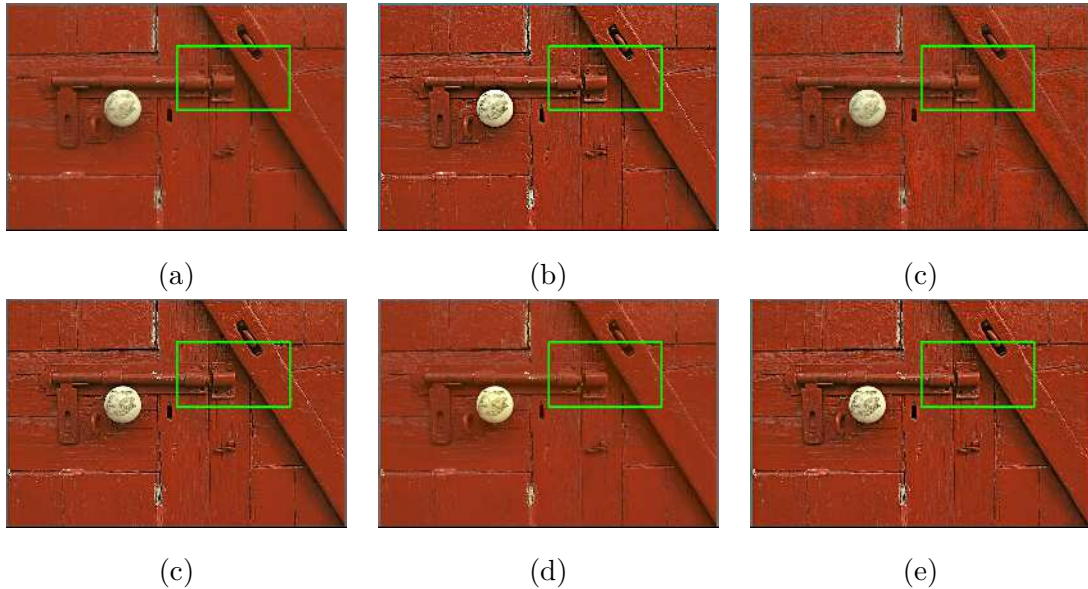


図 4.7: 2 枚目の結果画像. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスキング法, (c) Kou らの手法, (d) Xie らの手法, (e) Yu と Urahama の手法, (f) 提案手法.

Fig. 4.7: The results of image 2. (a) Original image, (b) general unsharp masking method, (c) Kou et al.'s method, (d) Xie et al.'s method, (e) Yu and Urahama's method, (f) proposed method.

表 4.1: HD と GRVE を用いた定量評価 (全データセットの平均値).

Table 4.1: Quantitative evaluation using HD and GRVE (the average score of all datasets).

	HD _{Raines}	HD _{Lab}	GRVE
一般的なアンシャープマスキング法	0.15	1.32	1.87
Kou らの手法	0.22	1.63	2.30
Xie らの手法	0.23×10^{-2}	0.15	1.70
Yu と Urahama の手法	0	0.47	1.56
提案手法	0	0.28	1.84

示す. 図 4.10 は図 4.9 における緑枠の拡大図である. 図 4.10(c) に示すように, 服の襟が Kou らの手法によって強調されている. 一方で, 図 4.10(b) の一般的なアンシャープマスキング法では, 服の襟の強調効果が弱い. 図 4.10(d) の提案手法は図 4.10(c) の服の襟の鮮鋭化の効果が保たれている. 表 4.2 に $I^c(i, j)$ を Kou らの手法の出力値にした場合の定量評価の結果を示す. 提案手法は Kou らの手法の GRVE の値を保ちつつ, HD_{Raines} と HD_{Lab} の値が小さい. また, 提案手法の HD_{Lab} は 0.39 よりも小さい.

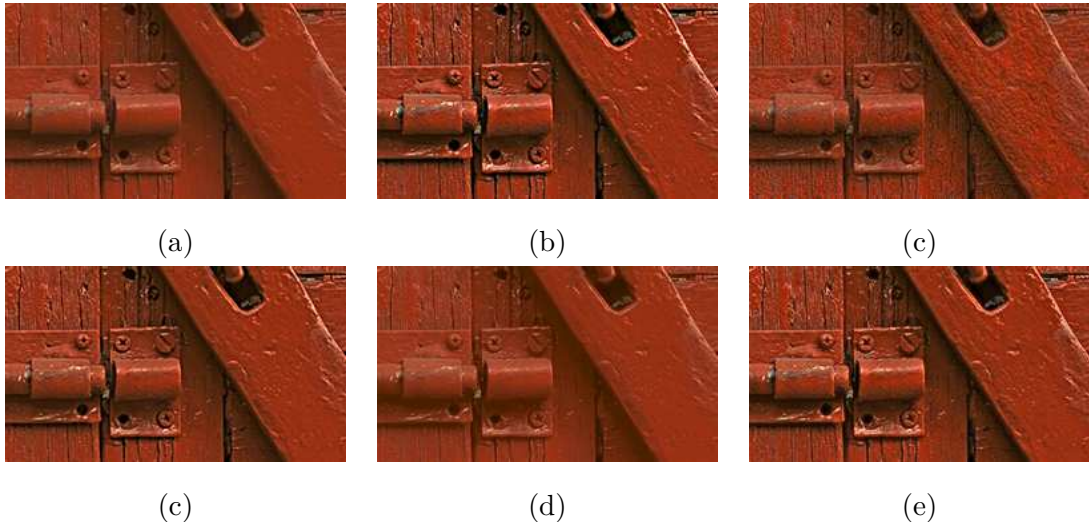


図 4.8: 2 枚目の結果の拡大図. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスキング法, (c) Kou らの手法, (d) Xie らの手法, (e) Yu と Urahama の手法, (f) 提案手法.

Fig. 4.8: Enlarged images of the results of image 2. (a) Original image, (b) general unsharp masking method, (c) Kou et al.'s method, (d) Xie et al.'s method, (e) Yu and Urahama's method, (f) proposed method.

表 4.2: HD と GRVE を用いた定量評価 (全データセットの平均値).

Table 4.2: Quantitative evaluation using HD and GRVE (the average score of all datasets).

	HD _{Raines}	HD _{Lab}	GRVE
Kou らの手法	0.22	1.63	2.30
提案手法 ($I^c(i, j)$ を Kou らの手法の出力値に変更)	0	0.25	2.28

図 4.11(d) と図 4.12(d) に $I^c(i, j)$ を Son らの手法の出力値にした場合の結果画像の一例を示す. 図 4.12 は図 4.11 における緑枠の拡大図である. 図 4.11(b) と (c) に示すように, Son らの手法と提案手法は影の領域におけるコントラストが強調されている. しかし, 図 4.12(b) に示すように, Son らの手法では不自然な色合いが生じている. その一方で, 図 4.12(c) の提案手法はその不自然な色合いが消えている. 表 4.3 に $I^c(i, j)$ を Son らの手法の出力値にした場合の定量評価の結果を示す. 提案手法は Son らの手法の GRVE の値を保ちつつ, HD_{Raines} と HD_{Lab} の値が小さい. また, 提案手法の HD_{Lab} は 0.39 よりも小さい.

以上の結果より, 提案手法は I^c の特徴を引き継ぎながら, 入力画像の色相を保存した結果を得ることができる. つまり, 詳細部の強調やコントラスト強調など画像強調の目的に応じて I^c をユーザが自由に設定することができる.

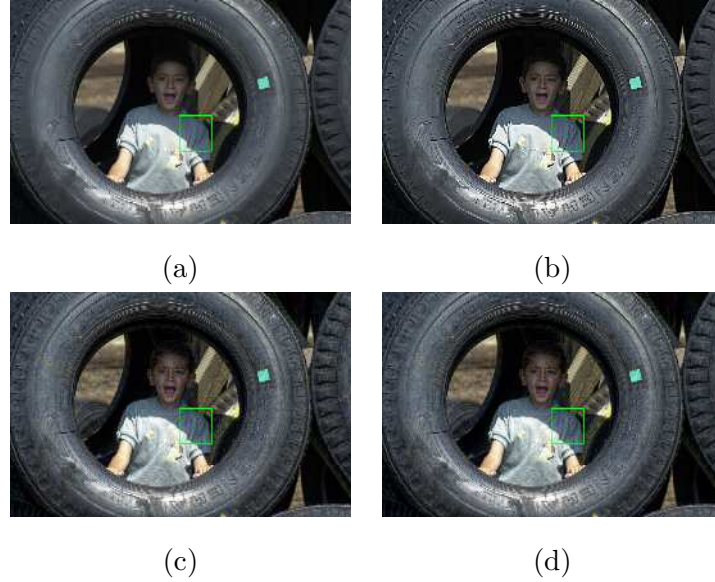


図 4.9: 3 枚目の結果画像. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスキング法, (c) Kou らの手法, (d) 提案手法 (I^c を Kou らの手法の出力値に変更).

Fig. 4.9: The results of image3. (a) Original image, (b) general unsharp masking method, (c) Kou et al.'s method, (d) proposed method (I^c is replace with Kou et al.'s method's output value).

表 4.3: HD と GRVE を用いた定量評価 (全データセットの平均値).

Table 4.3: Quantitative evaluation using HD and GRVE (the average score of all datasets).

	HD _{Raines}	HD _{Lab}	GRVE
Son らの手法	0.14	1.10	2.01
提案手法 ($I^c(i, j)$ を Son らの手法の出力値に変更)	0	0.33	2.00

4.3.5 α の変化による処理結果の変化

提案手法は RGB 各成分の強調度合いを変えたとしても適用可能である. ここで, アンシャープマスキングにおける鮮鋭化係数のパラメータ α_u を α_u^c , $c \in \{R, G, B\}$ とする. 図 4.13 と図 4.14 に α_u^c , $c \in \{R, G, B\}$ を変化させたときの結果画像の一例を示す. 図 4.13(a) は入力画像である. 図 4.13(b) と (c) はそれぞれ $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (2, 0, 0)$ のときの一般的なアンシャープマスキング法と提案手法の結果画像である. 図 4.13(d) と (e) はそれぞれ $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 2, 0)$ のときの一般的なアンシャープマスキング法と提案手法の結果画像である. 図 4.13(f) と (g) はそれぞれ $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 0, 2)$ のときの一般的なアンシャープマスキング法と提案手法

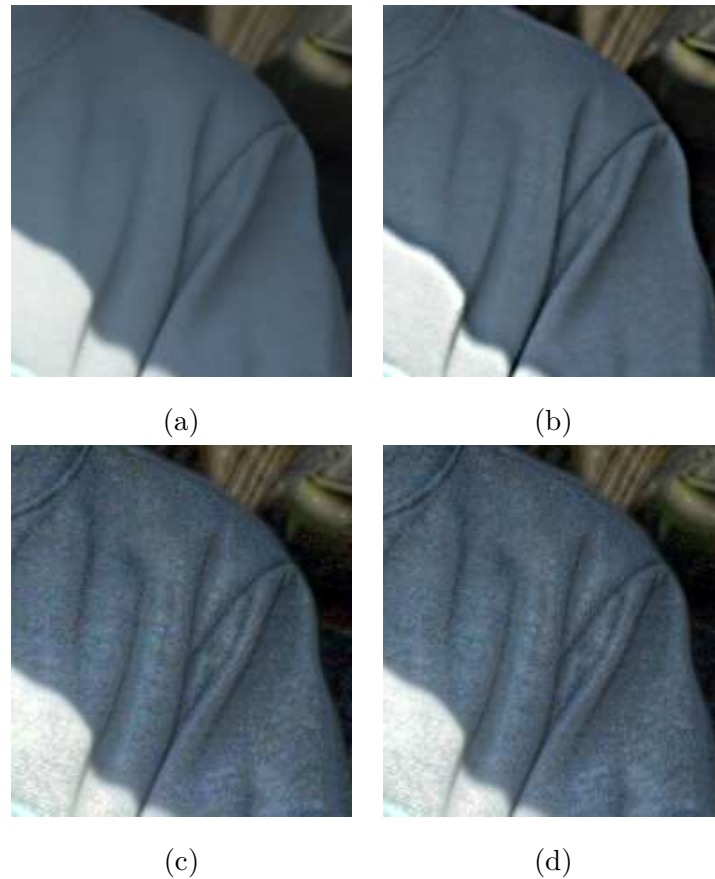


図 4.10: 3 枚目の結果画像の拡大図. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスキング法, (c) Kou らの手法, (d) 提案手法 (I^c を Kou らの手法の出力値に変更).

Fig. 4.10: Enlarged images of the results of image3. (a) Original image, (b) general unsharp masking method, (c) Kou et al.'s method, (d) proposed method (I^c is replace with Kou et al.'s method's output value).

の結果画像である. 図 4.14 は図 4.13 における緑枠の拡大図である. 図 4.14(b) に示すように, 一般的なアンシャープマスキング法の結果画像ではオレンジ色の帽子の輪郭が強調されている. しかし, 帽子の影の輪郭において不自然な赤色が生じている. 一方, 図 4.14(c) の提案手法では, 不自然な赤色が生じることなく, オレンジ色の帽子の輪郭が強調されている. 図 4.14(d) に示すように, 一般的なアンシャープマスキング法の結果画像では緑色の帽子の輪郭が強調されている. しかし, 帽子の影の輪郭において不自然な緑色が生じている. 一方, 図 4.14(e) の提案手法では, 不自然な緑色が生じることなく, 緑色の帽子の輪郭が強調されている. 図 4.14(f) の一般的なアンシャープマスキング法では帽子の影の輪郭において不自然な青色が生じている. 一方, 図 4.14(g) の提案手法では, 不自然な青色が生じていない. 不自然な



図 4.11: 4 枚目の結果画像. (a) 原画像, (b) Son らの手法, (c) 提案手法 (I'^c を Son らの手法の出力値に変更).

Fig. 4.11: The results of image4. (a) Original image, (b) Son et al.'s method, (c) proposed method (I'^c is replace with Son et al.'s method's output value).

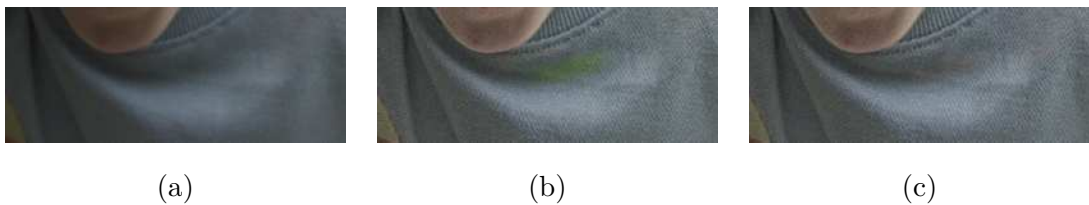


図 4.12: 4 枚目の結果画像の拡大図. (a) 原画像, (b) Son らの手法, (c) 提案手法 (I'^c を Son らの手法の出力値に変更).

Fig. 4.12: Enlarged images of the results of image4. (a) Original image, (b) Son et al.'s method, (c) proposed method (I'^c is replace with Son et al.'s method's output value).

緑色が生じることなく、緑色の帽子の輪郭が強調されている。

これらの結果から、特定の色の物体の輪郭のみを強調する場合にも提案手法が適応可能であることを示唆している。このような画像強調はアーティスティックな画像編集や色覚多様性のための画像強調^{82,83}への適用が考えられる。

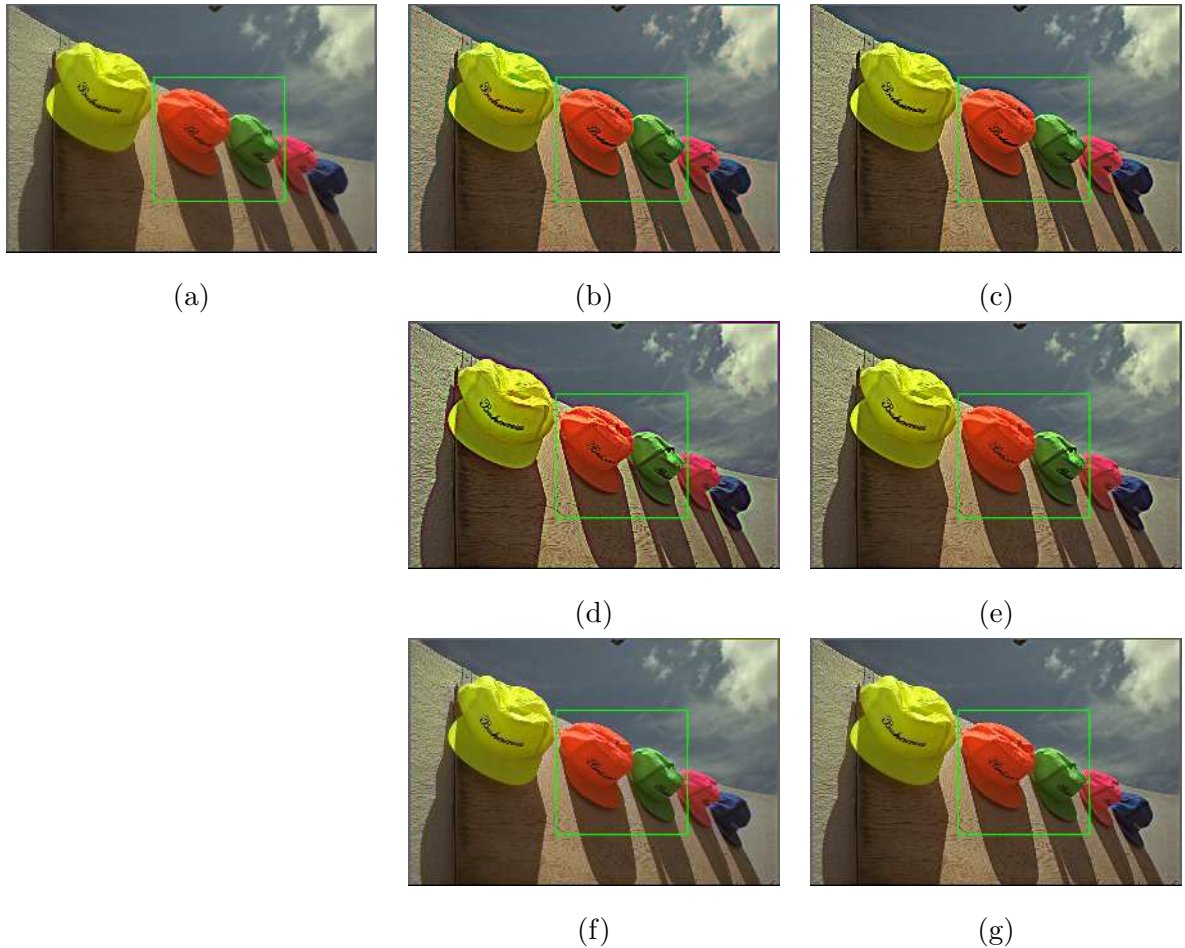


図 4.13: 5 枚目の結果画像. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスクング法 $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (2, 0, 0)$, (c) 提案手法 $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (2, 0, 0)$, (d) 一般的なアンシャープマスクング法 $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 2, 0)$, (e) 提案手法 $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 2, 0)$, (f) 一般的なアンシャープマスクング法 $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 0, 2)$, (g) 提案手法 $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 0, 2)$.

Fig. 4.13: The results of image5. (a) Original image, (b) general unsharp masking method $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (2, 0, 0)$, (c) proposed method $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (2, 0, 0)$, (d) general unsharp masking method $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 2, 0)$, (e) proposed method $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 2, 0)$, (f) general unsharp masking method $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 0, 2)$, (g) proposed method $(\alpha_u^R, \alpha_u^G, \alpha_u^B) = (0, 0, 2)$.

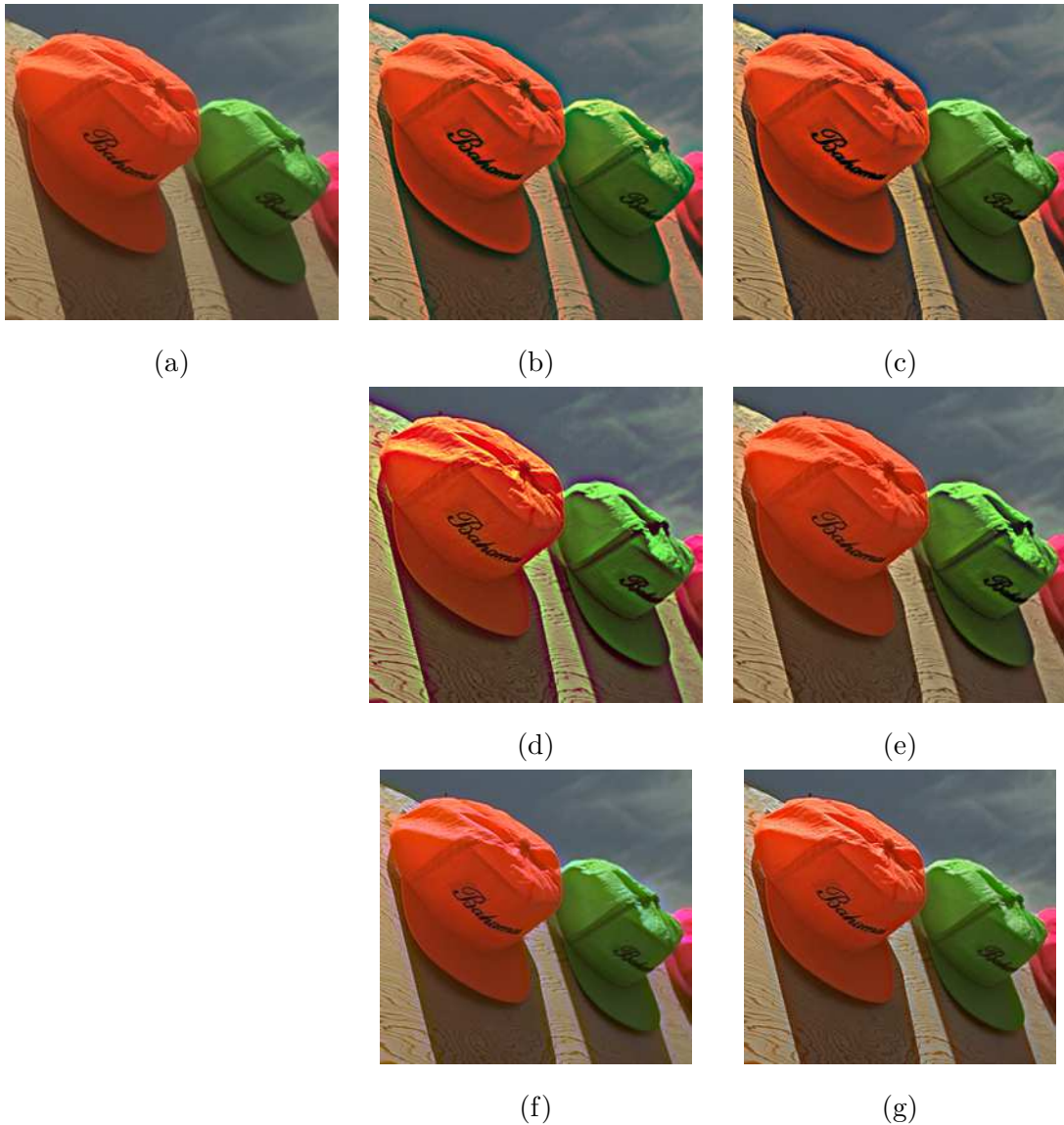


図 4.14: 5 枚目の結果画像の拡大図. (a) 原画像, (b) 一般的なアンシャープマスクング法 $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (2, 0, 0)$, (c) 提案手法 $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (2, 0, 0)$, (d) 一般的なアンシャープマスクング法 $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 2, 0)$, (e) 提案手法 $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 2, 0)$, (f) 一般的なアンシャープマスクング法 $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 0, 2)$, (g) 提案手法 $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 0, 2)$.

Fig. 4.14: Enlarged images of the results of image5. (a) Original image, (b) general unsharp masking method $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (2, 0, 0)$, (c) proposed method $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (2, 0, 0)$, (d) general unsharp masking method $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 2, 0)$, (e) proposed method $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 2, 0)$, (f) general unsharp masking method $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 0, 2)$, (g) proposed method $(\alpha^R, \alpha^G, \alpha^B) = (0, 0, 2)$.

4.4 結言

本章では、画像の色相を保ちつつ効果的に画像の詳細部を強調する手法について説明した。その手法では、入力画像の RGB 各成分にアンシャープマスクングを適用した画像を Naik と Murthy の色相保存の条件式で近似した。さらに、色域外の画素を RGB 色空間の等色相平面の辺に修正することで、色域を保証した出力画素値を求めた。実験では主観評価と定量評価を通じて、提案手法は自然な色合いを保ちつつ効果的に画像の詳細部を強調することができることを確認した。また、提案手法は近似する画像の特徴を引き継ぎながら、入力画像の色相を保存した結果を得ることができた。鮮鋭化係数を変えることにより、特定の色の物体の輪郭のみを強調する場合にも提案手法が適応可能であることを示唆していた。

付録 4.A 式 (4.7), (4.8) の導出

式 (4.4) を展開すると以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 E(i, j) = & \frac{1}{3} \left(\sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 + A(i, j)^2 \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 + 3B(i, j)^2 \right. \\
 & - 2A(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) I'^c(i, j) - 2B(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I'^c(i, j) \\
 & \left. + 2A(i, j)B(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) \right) \quad (4.A.1)
 \end{aligned}$$

$E(i, j)$ に対して $A(i, j)$ の偏微分を計算すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E(i, j)}{\partial A(i, j)} = & \frac{1}{3} \left(2A(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 - 2 \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) I'^c(i, j) \right. \\
 & \left. + 2B(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) \right). \quad (4.A.2)
 \end{aligned}$$

また、 $E(i, j)$ に対して $B(i, j)$ の偏微分を計算すると、以下のようになる。

$$\frac{\partial E(i, j)}{\partial B(i, j)} = \frac{1}{3} \left(6B(i, j) - 2 \sum_{c \in \{R, G, B\}} I'^c(i, j) + 2A(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) \right). \quad (4.A.3)$$

式 (4.A.2) と式 (4.A.3) はそれぞれ 0 になることが $E(i, j)$ を最小化する上での条件である。まず、式 (4.A.3) が 0 になることを考えると、

$$\frac{1}{3} \left(6B(i, j) - 2 \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) + 2A(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) \right) = 0, \quad (4.A.4)$$

$$6B(i, j) = 2 \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) - 2A(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \quad (4.A.5)$$

$$B(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) - A(i, j) \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \quad (4.A.6)$$

となる。ここで、

$$\frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) = \bar{I}(i, j), \quad (4.A.7)$$

$$\frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) = \bar{I}(i, j), \quad (4.A.8)$$

とすると、式 (4.A.6) は以下のようになる。

$$B(i, j) = \bar{I}(i, j) - A(i, j)\bar{I}(i, j). \quad (4.A.9)$$

以上より、式 (4.8) が導出された。

次に、式 (4.A.2) が 0 になることを考えると、

$$\frac{1}{3} \left(2A(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 - 2 \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) I^c(i, j) + 2B(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) \right) = 0, \quad (4.A.10)$$

$$\begin{aligned} & A(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 - \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) I^c(i, j) \\ & + (\bar{I}(i, j) - A(i, j)\bar{I}(i, j)) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) = 0, \end{aligned} \quad (4.A.11)$$

$$\begin{aligned} & A(i, j) \left(\sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 - \bar{I}(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) \right) \\ & = \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) I^c(i, j) - \bar{I}(i, j) \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \end{aligned} \quad (4.A.12)$$

$$\begin{aligned}
A(i, j) & \left(\frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 - \bar{I}(i, j) \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) \right) \\
& = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) I'^c(i, j) - \bar{I}(i, j) \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j), \tag{4.A.13}
\end{aligned}$$

$$A(i, j) = \frac{\frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} I^c(i, j) I'^c(i, j) - \bar{I}(i, j) \bar{I}(i, j)}{\frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (I^c(i, j))^2 - \bar{I}(i, j) \bar{I}(i, j)}, \tag{4.A.14}$$

となる。ここで、ある画素値 $\mathbf{J}(i, j)$ の RGB 成分の分散を $\sigma_{\mathbf{J}}^2(i, j)$ とすると以下のように表される。

$$\sigma_{\mathbf{J}}^2(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(i, j) - \bar{J}(i, j))^2. \tag{4.A.15}$$

$\bar{J}(i, j)$ は $\mathbf{J}(i, j)$ の RGB 成分の平均値である。また、式 (4.A.15) を展開し、整理すると以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
\frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(i, j) - \bar{J}(i, j))^2 & = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(i, j))^2 - 2\bar{J}(i, j) \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} J^c(i, j) + (\bar{J}(i, j))^2, \\
& = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(i, j))^2 - (\bar{J}(i, j))^2. \tag{4.A.16}
\end{aligned}$$

ある二つの画素値 $\mathbf{J}_1(i, j)$ と $\mathbf{J}_2(i, j)$ の RGB 成分の共分散を $s_{\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2}(i, j)$ とすると以下のように表される。

$$s_{\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2}(i, j) = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J_1^c(i, j) - \bar{J}_1(i, j)) (J_2^c(i, j) - \bar{J}_2(i, j)). \tag{4.A.17}$$

$\bar{J}_1(i, j)$ と $\bar{J}_2(i, j)$ はそれぞれ $\mathbf{J}_1(i, j)$ と $\mathbf{J}_2(i, j)$ の RGB 成分の平均値である。また、式 (4.A.17) を展開し、整理すると以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
\frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J_1^c(i, j) - \bar{J}_1(i, j)) (J_2^c(i, j) - \bar{J}_2(i, j)) & = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J_1^c(i, j) J_2^c(i, j)) \\
& \quad - \bar{J}_2(i, j) \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} J_1^c(i, j) - \bar{J}_1(i, j) \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} J_2^c(i, j) + \bar{J}_1(i, j) \bar{J}_2(i, j) \\
& = \frac{1}{3} \sum_{c \in \{R, G, B\}} (J_1^c(i, j) J_2^c(i, j)) - \bar{J}_1(i, j) \bar{J}_2(i, j) \tag{4.A.18}
\end{aligned}$$

式 (4.A.14) は式 (4.A.16), (4.A.18) より以下のように表すことができる。

$$A(i, j) = \frac{s_{\mathbf{I}, \mathbf{I}'}(i, j)}{\sigma_{\mathbf{I}}^2(i, j)}. \tag{4.A.19}$$

以上より、式 (4.7) が導出された。

付録 4.B 共面条件

$O(i, j)$ は以下の式によって求められる。

$$O(i, j) = A(i, j)I(i, j) + B(i, j)e. \quad (4.B.1)$$

一方で, $\mathbf{k} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{w} = (1, 1, 1)$, $\mathbf{c}(i, j) = (c^R(i, j), c^G(i, j), c^B(i, j))$ の3点によってできる平面上に点 $O(i, j) = (O^R(i, j), O^G(i, j), O^B(i, j))$ を考える. このとき, 4点在同一平面上にある条件 (共面条件) として, 以下が成り立つ.

$$O(i, j) = \mathbf{k} + s(\mathbf{w} - \mathbf{k}) + t(I(i, j) - \mathbf{k}). \quad (4.B.2)$$

ここで, s, t は変数である. また, $\mathbf{k} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{w} = (1, 1, 1) = \mathbf{e}$, $s = B(i, j)$, $t = A(i, j)$ とすると, 式 (4.B.2) は式 (4.B.1) と同じになる. したがって, $O(i, j)$ は黒 \mathbf{k} , 白 \mathbf{w} , 純色 $\mathbf{c}(i, j)$ と同一平面上にある.

付録 4.C 式 (4.17), (4.18) の導出

式 (4.16) において, $\mathbf{c}(i, j) - \mathbf{k} = \mathbf{d}_1(i, j)$, $O(i, j) - I(i, j) = \mathbf{d}_2(i, j)$ とすると, 以下のような式になる.

$$\mathbf{k} + s_{\mathbf{k}, \mathbf{c}}(i, j)\mathbf{d}_1(i, j) = I(i, j) + s_{I, O}(i, j)\mathbf{d}_2(i, j). \quad (4.C.1)$$

まず, 式 (4.17) の導出について述べる. 式 (4.C.1) の左辺における \mathbf{k} を右辺に移項し, 両辺で $\mathbf{d}_2(i, j)$ との外積を計算すると以下のような式になる.

$$s_{\mathbf{k}, \mathbf{c}}(i, j)\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j) = (I(i, j) - \mathbf{k}) \times \mathbf{d}_2(i, j) + s_{I, O}(i, j)\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j). \quad (4.C.2)$$

ここで, \times は外積の演算子である. また, $\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j) = \mathbf{0}$ である. 式 (4.C.2) の両辺で $\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j)$ との内積を計算し, さらに, 両辺で $(\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j))$ を割ると, 以下のような式になる.

$$s_{\mathbf{k}, \mathbf{c}}(i, j) = \frac{((I(i, j) - \mathbf{k}) \times \mathbf{d}_2(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j))}{(\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_2(i, j))}, \quad (4.C.3)$$

ここで, \cdot は内積の演算子である. 以上より, 式 (4.17) が導出された.

次に, 式 (4.18) の導出について述べる. 式 (4.C.1) の右辺における $\mathbf{I}(i, j)$ を左辺に移項し, 両辺で $\mathbf{d}_1(i, j)$ との外積を計算すると以下のようなになる.

$$(\mathbf{k} - \mathbf{I}(i, j)) \times \mathbf{d}_1(i, j) + s_{\mathbf{k}, \mathbf{c}}(i, j) \mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j) = s_{\mathbf{I}, \mathbf{O}}(i, j) \mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j). \quad (4.C.4)$$

$\mathbf{d}_1(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j) = \mathbf{0}$ である. 式 (4.C.4) の両辺で $\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j)$ との内積を計算し, さらに, 両辺で $(\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j))$ を割ると, 以下のようなになる.

$$\frac{((\mathbf{k} - \mathbf{I}(i, j)) \times \mathbf{d}_1(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j))}{(\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j)) \cdot (\mathbf{d}_2(i, j) \times \mathbf{d}_1(i, j))} = s_{\mathbf{I}, \mathbf{O}}(i, j). \quad (4.C.5)$$

左辺と右辺を入れ替えると, 式 (4.18) と同じになり, 式 (4.18) が導出された.

第5章 結論

本論文では、低照度画像／不鮮明な画像に対する RGB 色空間における等色相平面による画像強調手法について述べた。以下に、各章で得られた成果について述べる。

第2章では、まず、色空間変換を伴う画像強調について説明し、その問題点について述べた。デバイス独立色やマンセル表色系といった色空間の色域は、ディスプレイ表示可能な RGB 色空間の色域よりも広く定義されていた。そのため、色相、彩度、明度の三成分から構成される色空間に一度変換し、そのいずれかを変更し、表示のために RGB 色空間に逆変換を行うと、場合によっては、逆変換後の色が RGB 色空間の表示可能領域(色域)から逸脱する「色域問題」が発生していた。次に、RGB 色空間とその性質について説明した。RGB 色空間において色相を保つためには、Naik と Murthy の色相保存の条件式を満たす必要があった。その条件式より、同じ色相を持つ平面は白、黒、純色の三点で構成された三角形であった。また、入力画素を白、黒、純色の凸結合で表現することについて述べた。

第3章では、低照度画像に対して RGB 色空間の色域を保証しつつ、色相保存可能な画像強調法について説明した。まず、低照度画像における白、黒、純色の係数の分布について述べた。暗い画素のみを明るくする修正ガンマ変換や、明るい画素をほとんど変化させないガンマ分布の関数に従うヒストグラムの平滑化について説明した。これらの処理はすべて RGB 色空間の等色相平面内で行われており、色域の保証および画像の色相を保つことを可能にした。主観評価と定量評価の結果、第3章で述べた手法は過度な強調や不自然な色合いを引き起こすことなく、十分に視認性が改善される手法であることを確認した。

第4章では、RGB 色空間の色域を保証した等色相アンシャープマスキング法について説明した。提案手法では、RGB 各成分にアンシャープマスキングを適用した画像と Naik と Murthy の色相保存の条件式との二乗誤差をコスト関数として定義した。そのコスト関数を最小化する係数を求めることで、アンシャープマスキングによる詳細部強調の効果を保持した上で、画像の色相を保存する処理について述べた。さらに、色域外の画素を RGB 色空間の等色相平面を構成する辺に修正することで、色域を保証した等色相アンシャープマスク処理を実現した。主観評価と定量評価の結果、第4章で述べた手法は不自然な色合いを引き起こすことな

く、画像の詳細部を強調することができる手法であることを確認した。さらに、近似する画素を変更した実験結果より、提案手法は近似する画像の強調効果を保持した上で、色相を保存した画像を得ることができることを確認した。また、RGB各成分で鮮鋭化係数を変えたとしても、自然な色合いを保ちつつ詳細部を強調することができることを確認した。

以上のように、本論文では、低照度画像／不鮮明な画像に対して、RGB色空間の色域を保証しつつ、色相保存可能な画像強調法について述べた。種々の実験により提案手法の有効性を示し、低照度画像／不鮮明な画像の視認性改善に向けた画像強調において新たな方法論を確立した。

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、同大学院創成科学研究科 末竹規哲 教授の指導の下に行った研究の内、低照度／不鮮明な画像の強調に関する研究をまとめたものです。これらの研究を遂行するにあたり、熱心かつ温かみを持った御指導、御鞭撻を賜りました山口大学大学院創成科学研究科 末竹規哲 教授に深く感謝申し上げます。また、末竹規哲 教授からは研究者としての心得を御教示下さいました。さらに、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 浦上直人 教授、同研究科 川村正樹 教授、同研究科 新沼浩太郎 教授、同研究科 野崎隆之 准教授に心より感謝申し上げます。副査の先生方からは本論文の草稿やプレゼンテーションにおいて有益なフィードバックを賜りました。本論文をまとめるにあたり、有意義な御助言と御討論を頂いた近畿大学産業理工学部 古賀崇了 准教授、龍谷大学先端理工学部 植田祥明 講師に感謝の意を表します。著者が山口大学大学院創成科学研究科博士前期課程在学中に懇切丁寧な御指導、ならびに多くの励ましを通して研究の世界へ導いて下さいました同大学院創成科学研究科 内野英治 特命教授に深く感謝いたします。また、山口大学理学部物理・情報科学科のすべての先生方にも深く感謝の意を表します。著者は物理・情報科学科の講義を受講することで、非常に有益で興味深い経験を積むことができました。先生方の熱意ある指導と専門知識を賜ったことにより、著者は学問への理解が深まり、研究者としての可能性を見出すことができました。

最後に、研究者への道に理解を示して下さった両親、ならびに多くの御協力と御助言を頂きました画像情報科学研究室の方々に謝意を表します。

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 JP22KJ2342 の助成を受けたものです。

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] A.M. Reza, “Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement,” Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology, vol.38, pp.35–44, 2004.
- [4] I. Pitas and P. Kiniklis, “Multichannel techniques in color image enhancement and modeling,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.5, no.1, pp.168–171, 1996.
- [5] 塚田正人, 鈴木哲明, 井上晃, “ディジタル画像処理による自動高画質化技術,” 日本画像学会誌, vol.43, no.2, pp.90–97, 2004.
- [6] E. Eisemann and F. Durand, “Flash photography enhancement via intrinsic relighting,” ACM Transactions on Graphics (TOG), vol.23, no.3, pp.673–678, 2004.
- [7] G.C. Rafael and W.E. Richard, Digital Image Processing, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [8] 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.
- [9] 篠田博之, 藤枝一郎, 色彩工学入門, 森北出版, 2007.
- [10] 谷口慶治, 張小忙, デジタル色彩工学, 共立出版, 2012.
- [11] 嶋野法之, 色彩工学の基礎と応用, コロナ社, 2010.
- [12] 大田登, 色彩工学, 東京電機大学出版局, 2007.

- [13] 奥富正敏, デジタル画像処理 [改訂第二版], 公益財団法人画像情報教育振興協会, 2022.
- [14] 木村誠聡, 田口亮, “強調度合が可変な彩度ヒストグラム平坦化によるカラー画像の強調,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.92, no.2, pp.131–134, 2009.
- [15] C.-L. Chien, D.-C. Tseng, et al., “Color image enhancement with exact HSI color model,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.7, no.12, pp.6691–6710, 2011.
- [16] C.-H. Su, H.-S. Chiu, and T.-M. Hsieh, “An efficient image retrieval based on HSV color space,” 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering IEEE, pp.5746–5749 2011.
- [17] 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.95, no.12, pp.817–821, 2012.
- [18] Z. Ju, J. Chen, and J. Zhou, “Image segmentation based on the HSI color space and an improved mean shift,” *IET Conference Proceedings*, pp.135–140, IET, 2013.
- [19] M. Nikolova and G. Steidl, “Fast ordering algorithm for exact histogram specification,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.23, no.12, pp.5274–5283, 2014.
- [20] H. Endo and A. Taguchi, “Color image enhancement method with adjustable emphasis degree,” 2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) IEEE, pp.507–512 2017.
- [21] J.L. Lisani, “Adaptive local image enhancement based on logarithmic mappings,” 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.1747–1751, 2018.
- [22] C.C. Chien, Y. Kinoshita, S. Shiota, and H. Kiya, “A retinex-based image enhancement scheme with noise aware shadow-up function,” *International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) 2019*, vol.11049, pp.501–506, 2019.
- [23] 洪博哲, “カラーマネージメントの動向,” *映像情報メディア学会誌*, vol.52, no.6, pp.806–811, 1998.

- [24] 陳鴻興, 齊藤了一, 小寺宏暉, “画像の明度情報に適応した 3 次元色域マッピング法,” 日本画像学会誌, vol.40, no.1, pp.30–39, 2001.
- [25] P.E. Debevec and J. Malik, “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,” ACM SIGGRAPH 2008 Classes, pp.1–10, 2008.
- [26] 奥田正浩, “MATLAB を用いた高ダイナミックレンジ画像処理,” 映像情報メディア学会誌, vol.66, no.1, pp.61–64, 2012.
- [27] M. Kamiyama and A. Taguchi, “HSI color space with same gamut of RGB color space,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.100, no.1, pp.341–344, 2017.
- [28] J. Cai, S. Gu, and L. Zhang, “Learning a deep single image contrast enhancer from multi-exposure images,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.27, no.4, pp.2049–2062, 2018.
- [29] Y.-L. Liu, W.-S. Lai, Y.-S. Chen, Y.-L. Kao, M.-H. Yang, Y.-Y. Chuang, and J.-B. Huang, “Single-image HDR reconstruction by learning to reverse the camera pipeline,” Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1651–1660, 2020.
- [30] M. Kamiyama and A. Taguchi, “Color conversion formula with saturation correction from HSI color space to RGB color space,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.104, no.7, pp.1000–1005, 2021.
- [31] S.K. Naik and C. Murthy, “Hue-preserving color image enhancement without gamut problem,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.12, no.12, pp.1591–1598, 2003.
- [32] 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,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.96, no.5, pp.264–272, 2013.
- [33] S. Yang and B. Lee, “Hue-preserving gamut mapping with high saturation,” Electronics Letters, vol.49, no.19, pp.1221–1222, 2013.

- [34] 井上光平, 張子シュ, 原健二, 浦浜喜一, “Neugebauer モデルに基づくカラー画像の強調,” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集 2016 一般社団法人 映像情報メディア学会, pp.13B-3 2016.
- [35] Y. Ueda, H. Misawa, T. Koga, N. Suetake, and E. Uchino, “Hue-preserving color contrast enhancement method without gamut problem by using histogram specification,” 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.1123–1127, 2018.
- [36] 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 A, vol.102, no.4, pp.152–163, 2019.
- [37] 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, 2010.
- [38] X. Dong, Y. Pang, and J. Wen, “Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video,” ACM SIGGRAPH 2010 Posters, pp.1–1, 2010.
- [39] X. Jiang, H. Yao, S. Zhang, X. Lu, and W. Zeng, “Night video enhancement using improved dark channel prior,” 2013 IEEE International Conference on Image Processing, pp.553–557, 2013.
- [40] L. Li, R. Wang, W. Wang, and W. Gao, “A low-light image enhancement method for both denoising and contrast enlarging,” 2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.3730–3734, 2015.
- [41] E.H. Land and J.J. McCann, “Lightness and retinex theory,” Josa, vol.61, no.1, pp.1–11, 1971.
- [42] X. Guo, Y. Li, and H. Ling, “LIME: Low-light image enhancement via illumination map estimation,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.26, no.2, pp.982–993, 2016.

- [43] M. Li, J. Liu, W. Yang, X. Sun, and Z. Guo, “Structure-revealing low-light image enhancement via robust retinex model,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.27, no.6, pp.2828–2841, 2018.
- [44] A. Ignatov, N. Kobyshev, R. Timofte, K. Vanhoey, and L. Van Gool, “WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras,” *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp.691–700, 2018.
- [45] C. Chen, Q. Chen, J. Xu, and V. Koltun, “Learning to see in the dark,” *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.3291–3300, 2018.
- [46] R. Wang, Q. Zhang, C.-W. Fu, X. Shen, W.-S. Zheng, and J. Jia, “Underexposed photo enhancement using deep illumination estimation,” *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.6849–6857, 2019.
- [47] Y. Jiang, X. Gong, D. Liu, Y. Cheng, C. Fang, X. Shen, J. Yang, P. Zhou, and Z. Wang, “EnlightenGAN: Deep light enhancement without paired supervision,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.30, pp.2340–2349, 2021.
- [48] C. Guo, C. Li, J. Guo, C.C. Loy, J. Hou, S. Kwong, and R. Cong, “Zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement,” *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1780–1789, 2020.
- [49] C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral filtering for gray and color images,” *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271)IEEE*, pp.839–846 1998.
- [50] S. Paris, S.W. Hasinoff, and J. Kautz, “Local Laplacian filters: Edge-aware image processing with a Laplacian pyramid,” *ACM Transactions Graphics*, vol.30, no.4, p.68, 2011.
- [51] K. He, J. Sun, and X. Tang, “Guided image filtering,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.35, no.6, pp.1397–1409, 2012.

- [52] L. Xu, C. Lu, Y. Xu, and J. Jia, "Image smoothing via L_0 gradient minimization," Proceedings of the 2011 SIGGRAPH Asia Conference, pp.1–12, 2011.
- [53] Z. Li, J. Zheng, and Z. Zhu, "Content adaptive guided image filtering," 2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)IEEE, pp.1–6 2014.
- [54] T.N. Canh, K.Q. Dinh, and B. Jeon, "Edge-preserving nonlocal weighting scheme for total variation based compressive sensing recovery," 2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)IEEE, pp.1–5 2014.
- [55] F. Kou, W. Chen, Z. Li, and C. Wen, "Content adaptive image detail enhancement," IEEE Signal Processing Letters, vol.22, no.2, pp.211–215, 2014.
- [56] Z. Yu and K. Urahama, "Hue-preserving unsharp-masking for color image enhancement," IEICE Transactions on Information and Systems, vol.97, no.12, pp.3236–3238, 2014.
- [57] M. Aharon, M. Elad, and A. Bruckstein, "K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation," IEEE Transactions on Signal Processing, vol.54, no.11, pp.4311–4322, 2006.
- [58] J. Wright, Y. Ma, J. Mairal, G. Sapiro, T.S. Huang, and S. Yan, "Sparse representation for computer vision and pattern recognition," Proceedings of the IEEE, vol.98, no.6, pp.1031–1044, 2010.
- [59] Z.-F. Xie, S. Tang, D.-J. Huang, Y.-D. Ding, and L.-Z. Ma, "Photographic appearance enhancement via detail-based dictionary learning," Journal of Computer Science and Technology, vol.32, pp.417–429, 2017.
- [60] J.-Y. Zhu, T. Park, P. Isola, and A.A. Efros, "Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp.2223–2232, 2017.
- [61] X. Mao, Q. Li, H. Xie, R.Y. Lau, Z. Wang, and S. Paul Smolley, "Least squares generative adversarial networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp.2794–2802, 2017.

- [62] H. Son, G. Lee, S. Cho, and S. Lee, “Naturalness-preserving image tone enhancement using generative adversarial networks,” *Computer Graphics Forum*, vol.38, no.7, pp.277–285, 2019.
- [63] Commission Internationale l’Éclairage, “Commission internationale de l’ eclairage proceedings,” 1931.
- [64] T. Smith and J. Guild, “The CIE colorimetric standards and their use,” *Transactions of the Optical Society*, vol.33, no.3, p.73, 1931.
- [65] R.S. Hunter, “Photoelectric color difference meter,” *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, vol.48, no.12, p.985, 1958.
- [66] G.H. Joblove and D. Greenberg, “Color spaces for computer graphics,” *ACM Siggraph Computer Graphics*, vol.12, no.3, pp.20–25, 1978.
- [67] M.-S. Shyu and J.-J. Leou, “A genetic algorithm approach to color image enhancement,” *Pattern Recognition*, vol.31, no.7, pp.871–880, 1998.
- [68] D. Yu, L.-H. Ma, and H.-Q. Lu, “Normalized SI correction for hue-preserving color image enhancement,” *2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol.3IEEE, pp.1498–1503 2007.
- [69] 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.
- [70] F. Pitié, A.C. Kokaram, and R. Dahyot, “Automated colour grading using colour distribution transfer,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol.107, no.1-2, pp.123–137, 2007.
- [71] M. Mackenzie and A.K. Tieu, “Asymmetric kernel regression,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol.15, no.2, pp.276–282, 2004.
- [72] K. Gu, W. Lin, G. Zhai, X. Yang, W. Zhang, and C.W. Chen, “No-reference quality metric of contrast-distorted images based on information maximization,” *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol.47, no.12, pp.4559–4565, 2016.

- [73] K. Gu, D. Tao, J.-F. Qiao, and W. Lin, “Learning a no-reference quality assessment model of enhanced images with big data,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol.29, no.4, pp.1301–1313, 2017.
- [74] S. Wang, J. Zheng, H.-M. 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, 2013.
- [75] G.L. Raines, “Digital color analysis of color-ratio composite landsat scenes,” *ERIM Proc. of the 11th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment*, pp.1463–1472, 1977.
- [76] N. Hautiere, J.-P. Tarel, D. Aubert, and E. Dumont, “Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges,” *Image Analysis & Stereology*, vol.27, no.2, pp.87–95, 2008.
- [77] F. Dunn and I. Parberry, *3D Math Primer for Graphics and Game Development*, CRC Press, 2011.
- [78] University of Southern California, “The usc-sipi image database,” <https://sipi.usc.edu/database/>. Accessed Aug. 2022.
- [79] NASA, “Retinex image processing,” <https://dragon.larc.nasa.gov/retinex/pao/news/>. Accessed May 2019.
- [80] Kodak, “Kodak lossless true color image suite,” <https://r0k.us/graphics/kodak/>. Accessed Aug. 2022.
- [81] 小松原仁, “均等色差空間に基づく色差式に関する研究 : CIELAB 色空間の均等色差空間への適用変換式の開発,” 博士論文, 新潟大学, 2007.
- [82] L. Xu, Q. Li, X. Liu, Q. Xu, and M.R. Luo, “Gamut mapping based image enhancement algorithm for color deficiencies,” *Biomedical Optics Express*, vol.12, no.11, pp.6882–6896, 2021.

- [83] W.A.R.W. Ayub and M. Mohamad, "Image re-colourisation in understanding the red-green colour blindness," *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, vol.3, no.2, pp.929–935, 2022.