

白黒フィルム写真のカラー化

5年B組 上田 樹

指導教員 米田 隆恒

1. 要約

白黒写真に記録されている情報とは、各画素の輝度の情報のみである。カラー情報にはR、G、Bの3つの要素が必要であるため、白黒写真のカラー化は一般的に不可能だといわれてきた。しかし私は、1画素ではなく写真全体で見れば、輝度の分布、輝度の変化量の分布に元の色による違いが現れることに気付いた。そこで、私はまず写真内に存在する色は、元の物体の色に応じて規則があると、「基準色」「屈折点」という2つの情報のみで近似させた。また、白黒写真からでも得ることのできる、輝度の分布、輝度の変化量の分布のそれぞれのヒストグラムがこれらに関係することが分かった。この研究では、このように白黒写真から得られる情報のみによるカラー化を目指す。

キーワード 輝度、カラーモデル、基準色、屈折点、CG、法線ベクトル

2. 研究の背景と目的

私が以前、父の子供の頃のアルバムを見せてもらった際、父はそのアルバムが白黒写真であることを気にしていた。カメラ屋などでのカラー化は手作業であるため高価で、アルバム単位での依頼は難しい。機械的にカラー化できないかと考えたが、白黒写真に残された情報は輝度情報のみで、カラー画像は各画素にR,G,Bの3つの情報を持っている。そのため、輝度だけでは色が1つに定まらず、機械的なカラー化は不可能であるように思えた。しかしその後、私は写真を撮っている際、写真全体の明るさ、明るさの変化の仕方が色によって異なることに気付いた。そこでこの研究では、これら白黒写真から得られる情報のみ、つまり「木であるから緑」といった資料なしでのカラー化を目指す。

3. 研究内容

3.1 従来のカラーモデル

カラーモデルとは、色を規則に沿って2次元あるいは3次元空間上に配列する形式であり、色を座標で指示できるようにしたものである。カラーモデルを用いれば、色同士の違いという人間的な感覚を、それぞれの色を座標として扱うことで数値的に違いを調べることができる。

白黒写真から元の色を推測するためには、色ごとの輝度や彩度、色相の違いを明確にする必要がある。しかし、従来のカラーモデルの多くは、HLSモデル(図1)のように3原色で輝度がそれぞれ等しいとしてしまっており、色ごとの違いを考慮できていない。また、人の目での色の感度を正確に計測したCIEカラースペース(図2)等では、形状が複雑で、三原色RGBへの分解に不規則なデータを必要としてしまうため、カラー化を考えづらくなってしまう。

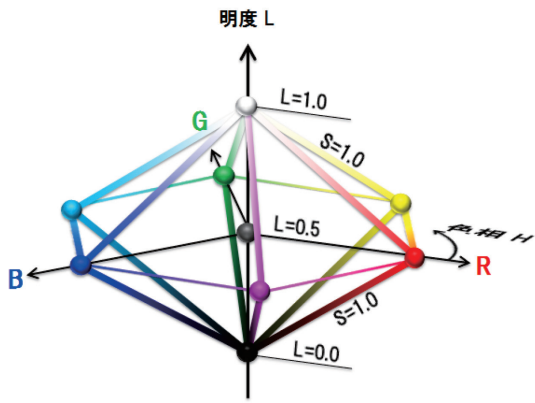


図1 HLS モデル

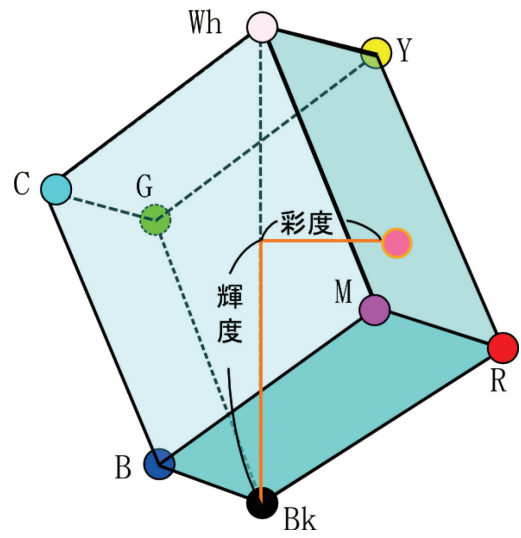


図4 輝度と彩度の関係

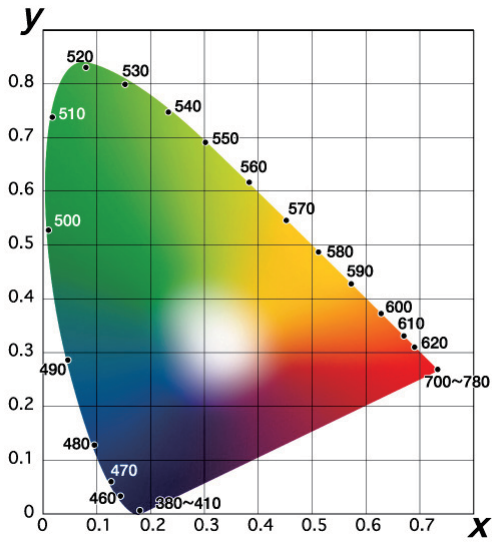


図2 CIE xyz カラー空間

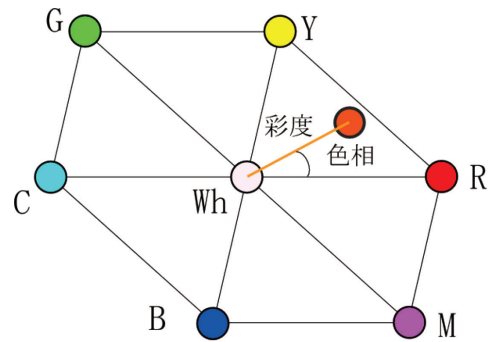


図5 彩度と色相の関係 z 方向から見た図

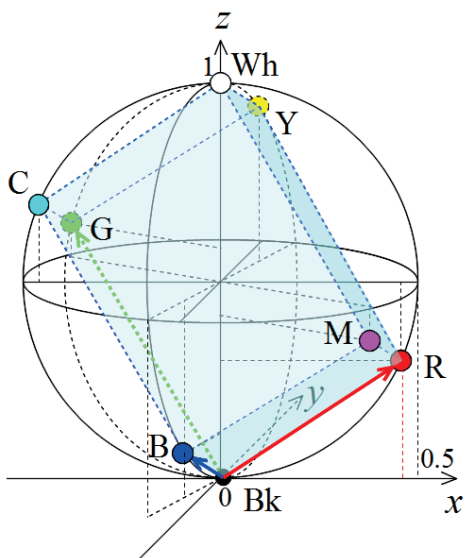


図3 URS モデル

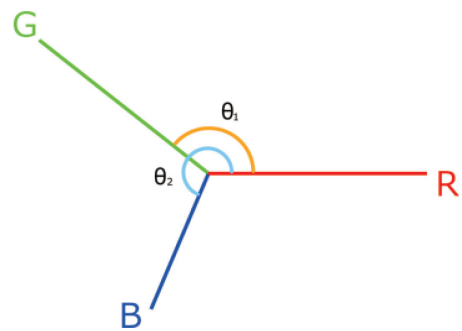


図6 RGB の色相関係

3.2 新しいカラーモデル(URS モデル)

従来モデルの問題点を解消し、白黒写真から得られる輝度情報から元の色を復元するために、輝度と色との関係を明確に示せる新しいカラーモデル Ueda Rectangular Solid model(URS モデル)を定義する。完成したものが図3である。

3.2.1 URS モデルの定義

一般に、色を数値で表すにはいくつかの方法がある。三原色 R、G、B の各強度を r, g, b とするとき、これを $\{r, g, b\}$ と記すことにする。ただし、 $0 \leq r, g, b \leq 1$ である。

また、色は「輝度」、「彩度」、「色相」によって表される。この3つの自由度を表すために URS モデルは3次元直交座標の位置 (x, y, z) で色を表すことにする。

$\{r, g, b\}$ 、輝度、彩度、色相と URS モデルの座標 (x, y, z) を次のようにして決定する。

[定義]

[輝度] 輝度はモデル内の高さ z で表し、Bk の座標を $(0, 0, 0)$ 、Wh を $(0, 0, 1)$ とする。三原色の強度が $\{r, g, b\}$ の色の輝度は、一般にカラー画像を白黒化する際に用いられる式をそのまま使い、次式で定義する。

$$\text{輝度} = 0.29891r + 0.58661g + 0.11448b \quad (1)$$

[彩度] 彩度は z 軸からの距離で表す。

$$\text{彩度} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

[色相] 色相は x 軸から計った z 軸のまわりの回転角 θ で表す。ただし、R の色相は $\theta = 0$ とし、この向きを x 軸とする。また、G の方が B より θ が小さいとする。

[色と基準ベクトル] モデル内の Bk から R、G、B に引いたベクトル $\overline{\text{BkR}}$ 、 $\overline{\text{BkG}}$ 、 $\overline{\text{BkB}}$

を基準ベクトルという。

色 P の成分を $\{r, g, b\}$ とするとき、色 P の URS モデル内の座標は基準ベクトルを用いて次式で定義する。

$$\overline{\text{BkP}} = r \cdot \overline{\text{BkR}} + g \cdot \overline{\text{BkG}} + b \cdot \overline{\text{BkB}} \quad (3)$$

式(1)の輝度は、明るい色ほど URS モデルでは高い位置に座標をとり、また完全な赤、緑、青では、緑が最も高く青が最も低い位置に座標をとることを意味する。

式(2)の彩度は、Bk-Wh 軸(z 軸)上の色、つまり全てのグレーで 0 となり、色鮮やかなほど z 軸から離れた位置に座標をとることを意味する。

3.2.2 URS モデルの条件

以上の定義だけでは、3原色 R、G、B およびそれらの補色 C、M、Y の URS モデル内の座標を計算することはできない。そこで、さらに条件を追加する。

[条件1]

URS モデルの形状は、色を簡単に3原色に分解できるようにするため、全ての色が $r \cdot \overline{\text{BkR}} + g \cdot \overline{\text{BkG}} + b \cdot \overline{\text{BkB}}$ の形で表せなければならない。つまり $\overline{\text{BkR}}$ 、 $\overline{\text{BkG}}$ 、 $\overline{\text{BkB}}$ の3つのベクトルは一次独立であり、URS モデルはこれらのベクトルで各辺が表せる平行六面体でなければならない。以上は基準ベクトルの定義で保証されている。

[条件2]

基本の6色で補色関係にある色 R と C、G と M、B と Y の相対的な位置関係は等しく、それぞれの距離は Bk-Wh の距離 1 に等しいとする。まとめると、

$$\vec{r} = \overline{\text{BkR}}, \vec{g} = \overline{\text{BkG}}, \vec{b} = \overline{\text{BkB}} \quad \text{とおくとき、}$$

$$\begin{aligned}
\overline{\text{BkC}} &= \vec{g} + \vec{b} \\
\overline{\text{BkM}} &= \vec{r} + \vec{b} \\
\overline{\text{BkY}} &= \vec{r} + \vec{g} \\
\overline{\text{BkWh}} &= \vec{r} + \vec{g} + \vec{b}
\end{aligned} \quad (4)$$

[条件3]

URSモデルでの基本の6色は平行六面体の各頂点に位置し、それぞれ輝度0.5のグレー(0,0,0.5)から等距離にあり、距離は0.5とする。したがって、この平行六面体は、(0,0,0.5)を中心とする半径0.5の球面に内接する。

3.2.3 URSモデルの確定

以上の条件から、URSモデル内の基本の6色、つまり、平行六面体の各頂点の座標を決定した。

3原色R、G、Bの座標を

$\vec{r} = (r_x, r_y, r_z), \vec{g} = (g_x, g_y, g_z), \vec{b} = (b_x, b_y, b_z)$ とおく。赤Rは{1,0,0}であるから、輝度の定義式(1)に代入すると、 $r_z = 0.29891$ が求まる。同様にして、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
r_z &= 0.29891 \\
g_z &= 0.58661 \\
b_z &= 0.11448
\end{aligned} \quad (5)$$

3原色R、G、Bの彩度をそれぞれ r_s, g_s, b_s とすると、条件3および式(5)より、

$$\begin{aligned}
r_s &= \sqrt{0.5^2 - (0.5 - r_z)^2} = 0.45778 \\
g_s &= \sqrt{0.5^2 - (0.5 - g_z)^2} = 0.49244 \\
b_s &= \sqrt{0.5^2 - (0.5 - b_z)^2} = 0.31839
\end{aligned} \quad (6)$$

Gの色相を θ_1 、Bの色相を θ_2 とおくと、

$$\begin{aligned}
\overline{\text{BkWh}} &= \vec{r} + \vec{g} + \vec{b} \text{ より、} \\
r_s \cos 0 + g_s \cos \theta_1 + b_s \cos \theta_2 &= 0 \\
r_s \sin 0 + g_s \sin \theta_1 + b_s \sin \theta_2 &= 0
\end{aligned}$$

これを解くと、

$$\begin{aligned}
\theta_1 &= 2.4620 \text{ rad} \\
\theta_2 &= 4.4740 \text{ rad}
\end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned}
\vec{r} &= (0.45778, 0.00000, 0.29891) \\
\vec{g} &= (-0.38303, 0.30949, 0.58661) \\
\vec{b} &= (-0.07475, -0.30949, 0.11448)
\end{aligned}$$

となり、他の頂点も式(4)から次のように求まる。

$$\begin{aligned}
\text{Bk} &= (0, 0, 0) \\
\overline{\text{BkWh}} &= (0, 0, 1) \\
\overline{\text{BkC}} &= (-0.45778, 0.00000, 0.70109) \\
\overline{\text{BkM}} &= (0.38303, -0.30949, 0.41339) \\
\overline{\text{BkY}} &= (-0.07475, 0.30949, 0.88552)
\end{aligned}$$

以上で新しいカラーモデル URS モデルが決定できた。

3.2.4 URS座標への変換

RGB色空間からURSモデルへの座標の変換は次式で定義する。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x & g_x & b_x \\ r_y & g_y & b_y \\ r_z & g_z & b_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \quad (7)$$

逆にRGB色空間への座標の変換は、

$$\begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x & g_x & b_x \\ r_y & g_y & b_y \\ r_z & g_z & b_z \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (8)$$

で計算できる。

RGB各成分と輝度との関係が、URSモデルで用いた式(1)と異なる写真フィルムの場合でも、式(1)の定数を写真フィルムのものに変更し、それ以外の定数を計算し直せば、URSモデルはそのまま使うことができる。

3.3 光の挙動の計算

写真内の色の特徴を考える際、CG のレンダラの計算が参考になると考えた。そこで、実験用レンダラの製作と、写真内で色の決定に必要な条件の特定を行った。計算式には、物理ベースのレンダリング方程式に用いられる光の反射モデルの1つであるBRDFの式を用いた。

BRDFでは、反射する光の挙動を、物体が色に応じて吸収する拡散反射の成分と、視線の向きへそのまま反射する鏡面反射の成分に分けて考える。木の表面などざらざらした表面では拡散反射の性質が強くみられ、また鉄球や鏡では鏡面反射の性質が強くみられる。

図7の各ベクトルはすべて長さ1の単位ベクトルであり、 \vec{L} は物体の反射点Oから見た光源方向、 \vec{V} は視線方向、 \vec{N} は物体表面の法線方向である。また、 $\angle LOV$ を二等分する方向を \vec{H} とし、 \vec{H} に垂直な微小面を点線で表している。さらに、入射角 $\angle LON$ を θ 、 $\angle HON$ を γ 、光の波長を λ とする。

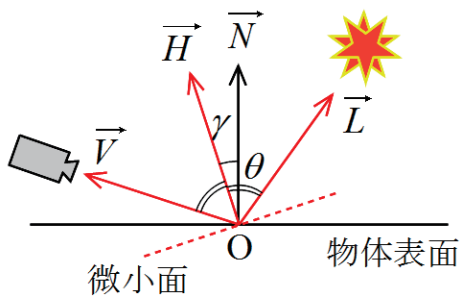


図7 反射に関するベクトル

まず拡散反射は、面が受け取った光を全ての向きに均等に再放射すると考えるので、面が光をどれだけ受け取れるかによって拡散反射の強度は変化する。その面が受け取る光の割合は、入射角 θ が大きいほど小

さくなり、ベクトル \vec{L} とベクトル \vec{N} の内積で与えられる。

次に鏡面反射は鏡で起こるような反射であり、 \vec{L} と \vec{V} の二等分方向 \vec{H} に垂直な微小面で起こると考えたときの反射である。物体表面が滑らかでなく、粗さを持っている場合は、そのような微小面が物体表面に存在すると考えるのである。その微小面の存在する割合を微小面勾配分布関数 $D(\gamma)$ 、その向きの微小面で反射した光が物体の凹凸によって遮られる割合を幾何学的減衰率 G 、その向きにおける鏡面反射係数 $F(\lambda, \theta)$ とおく。このとき、鏡面反射の輝度 I_{spec} は

$$I_{spec} = \frac{F(\lambda, \theta)D(\gamma)G}{\pi \cdot (\vec{N} \cdot \vec{V})(\vec{N} \cdot \vec{L})} \quad (9)$$

で与えられる。なお、式(9)から式(13)は参考文献[2]で与えられているものを引用する。

各項は次のようにして求められる。

まず鏡面反射係数 $F(\lambda, \theta)$ には、フレネルの方程式を用いる。入射角を θ 、調べる光の波長を λ 、その波長での屈折率を η_λ とおくと、

$$F(\lambda, \theta) = \frac{(g-c)^2}{2(g+c)^2} \left[1 + \left\{ \frac{c(g+c)-1}{c(g+c)+1} \right\}^2 \right] \quad (10)$$

ここで、 $c = \cos \theta = \vec{V} \cdot \vec{H}$

$$g^2 = \eta_\lambda^2 + c^2 - 1$$

で求められる。つまり、 \vec{V} と \vec{H} と物体の質感から求めることができる。

微小面勾配分布関数 $D(\gamma)$ は、いくつか手法があるが、今回はベックマン分布関数を用いた。ベクトル \vec{H} と \vec{N} のなす角を γ 、表面の粗さを m と置くと、

$$D(\gamma) = \frac{1}{4m^2 \cos^2 \gamma} e^{-\left(\frac{\tan \gamma}{m}\right)^2} \quad (11)$$

で求められる。つまり、 \vec{H} と \vec{N} と物体の質

感から求めることができる。

最後に、幾何学減衰関数 G である。微小面に当たる光は、周囲の微小面によって入射光または反射光の一部が遮られる。まず、入射光が遮られる場合の減衰率 G_b は、

$$G_b = \frac{2(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{L})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})} \quad (12)$$

である。また、反射光が遮られる場合の減衰率 G_c は、

$$G_c = \frac{2(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{V})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})} \quad (13)$$

である。減衰は入射時または反射時のどちらかのみで起こり、減衰率 G は 0 (完全にさえぎられる) ~ 1 (減衰なし) であるから、

$$G = \min\{1, G_b, G_c\}$$

である。つまり、 \vec{N} 、 \vec{V} 、 \vec{L} 、 \vec{H} から求めることができる。

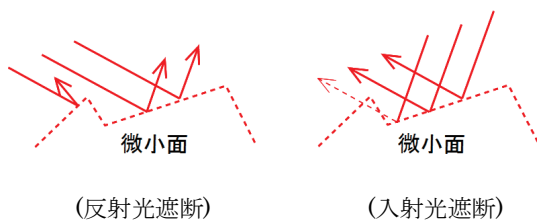


図 8 微小面による幾何学減衰

よって、写真内で色を左右する要素は、ベクトル \vec{N} 、 \vec{V} 、 \vec{L} 、 \vec{H} と物体の質感である。

3.4 理想的なモデル

カラー化を考える際、最初から実際の写真のような複雑で多様な条件を考慮するのは困難である。そこで、実際の写真と似た特徴を持ち、かつ単純な画像があれば理想的であると考えた。光の挙動の計算式を基に、このような理想的なモデルを考案した。

写真に写る色は、法線ベクトル、視線方向、光源方向、光源を視線方向に反射可能な微小面の法線ベクトル、物体の質感の 5

つの要素によって変化する。このうち、まず光源は太陽光線と考えると平行光線であるため、写真に写るどの部分でも光源方向は変化しない。次に、視点が物体から十分に離れているとすると、平行投影に近づくため、写真内で視線方向は変化しないとみなすことができる。さらに、鏡面反射を起こす微小面の法線ベクトルは、視線方向ベクトルと光源方向ベクトルのハーフベクトルであるため、変化しないと言える。よって物体の質感が同じである範囲においては、写真の色の変化は法線ベクトルの変化によってのみ起こるといえる。

[仮説]

実際の写真において、ある程度広い範囲が撮られており、全ての方向に均等に法線ベクトルが分布している場合、写真内に映りうる色は、全ての向きに等しい割合で法線ベクトルをもつと考え、「球体」によってすべてを調べることができる考える。

この球体を「理想的なモデル」とし、条件を変えて映した球体の CG 画像を用いて、色を調べることにする。

3.5 理想的なモデルを用いた数値実験

球体の CG 画像(図 9 左)の各画素の色を URS モデルにプロットすると、図 9 右のようになる。

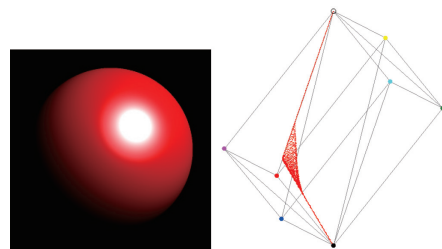


図 9 URS モデル内の色の分布

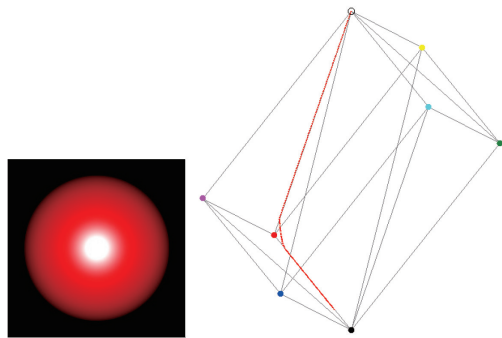
図9右のモデルでは、CG 画像に表した元の色である「少し明るい赤色」の点と白 Wh、黒 Bk を結んだ線上に、CG 画像内のほとんどの色がのっており、元の色の点の少し内側でそれぞれ折れ曲がり、さらにその囲まれた領域に散らばりを持っている。

そこで、CG で画像の条件を変えた際、URS モデルにプロットされた点の並びがどのように変化するかを調べる。

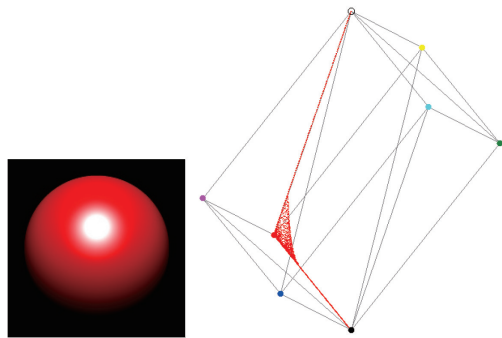
物体の色を(R,G,B)=(1, 0, 0)、反射率を2.0、表面の粗さを0.1、光源の強さを15、光源を白色光、光源方向と視線方向のなす角を0°、以上を基本条件とし、これらの一部を系統的に変化させたとき、URS モデル内の点の分布がどう変化するかを調べる。

[数値実験1：光源方向の影響]

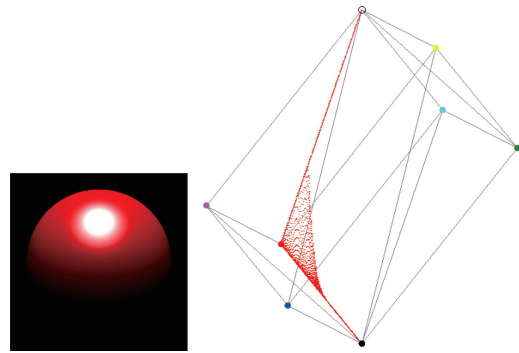
光源方向を x 軸の周りで視線方向から0°、30°、60°、90° と変化させた際、色の並びがどう変化するかを調べる。



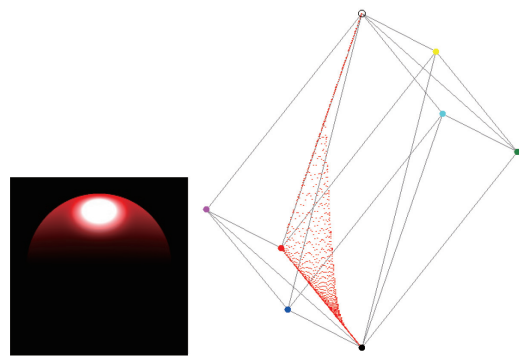
実験 1-1 光源方向を 0° 回転



実験 1-2 光源方向を 30° 回転



実験 1-3 光源方向を 60° 回転

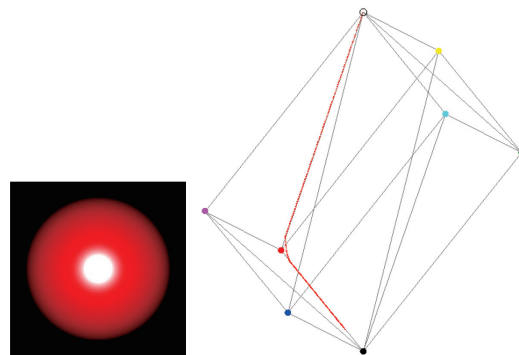


実験 1-4 光源方向を 90° 回転

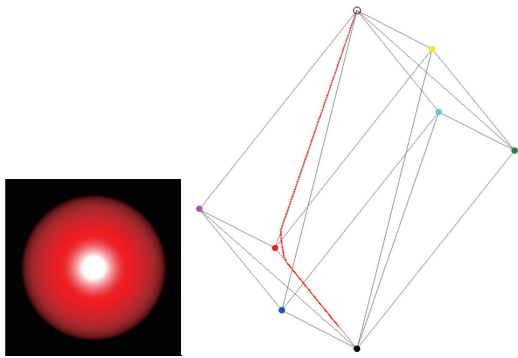
このように、光源方向を変化させた場合、視線方向となす角が広がるほど散らばりが強くなった。また、外側の主な線は変化しないことがわかった。

[数値実験2：表面の粗さ m の影響]

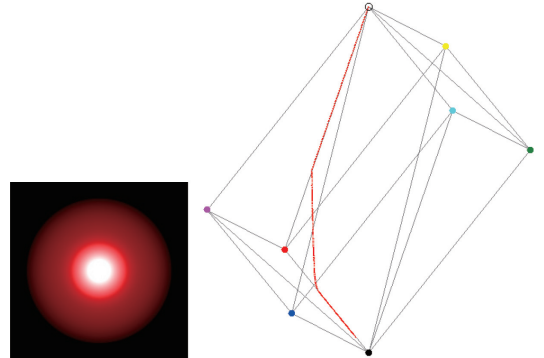
光源方向を 0° とし、物体の表面の粗さを変化させた際の色の分布を調べる。



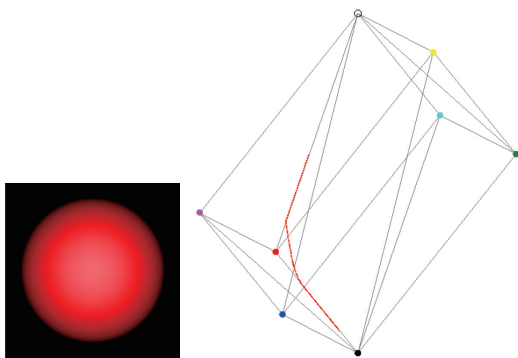
実験 2-1 荒さ 0.0



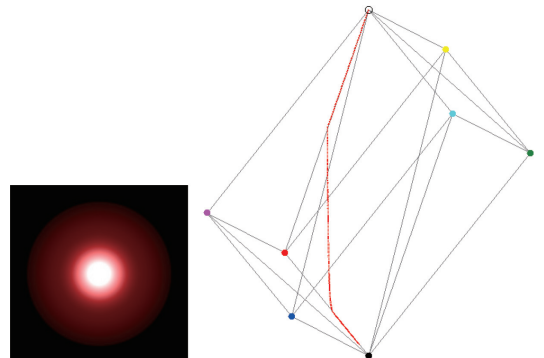
実験 2-2 荒さ 0.1



実験 3-2 物体の色(0.7, 0, 0)



実験 2-3 荒さ 0.5

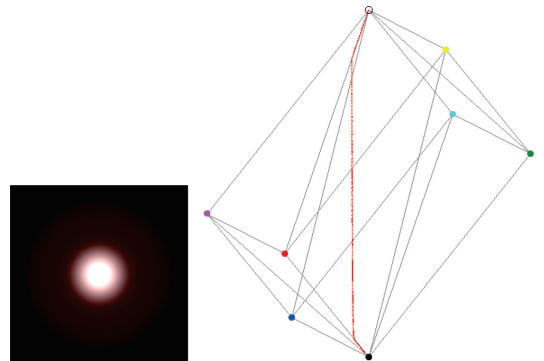


実験 3-3 物体の色(0.4, 0, 0)

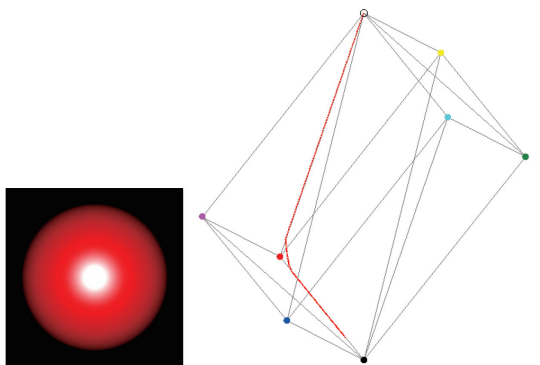
このように、粗さを変化させても Bk および Wh から折れ曲がり点までは変化はないが、荒さを上げるほど折れ曲がり点が Bk、Wh に近づくことがわかった。

[数値実験 3 : 物体の色の濃さの影響]

物体の色を(R,G,B)=(1.0, 0, 0)、(0.7, 0, 0)、(0.4, 0, 0)、(0.1, 0, 0) のように、色の濃さを変化させたときの色の分布を調べる。



実験 3-4 物体の色(0.1, 0, 0)

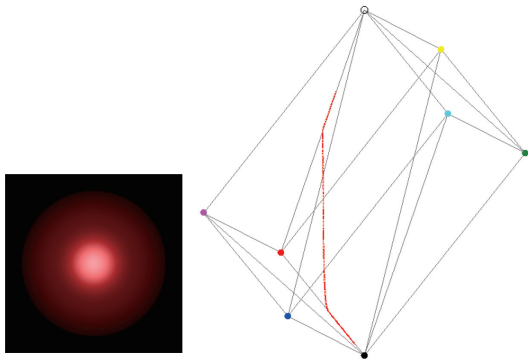


実験 3-1 物体の色(1.0, 0, 0)

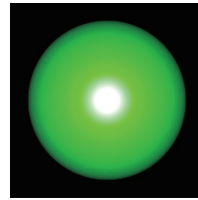
このように、物体の色の濃さを変化させても Bk および Wh から折れ曲がり点までは変化はないが、色が濃くなるほど折れ曲がり点が Bk、Wh に近づくことがわかった。

[数値実験 4 : 光源の強さの影響]

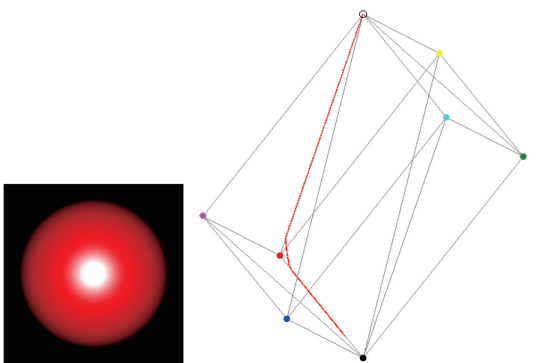
光源の強さを 10、20、30 と変化させた場合の色の分布を調べる。



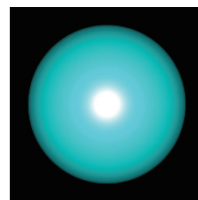
実験 4-1 光源の強さ 10



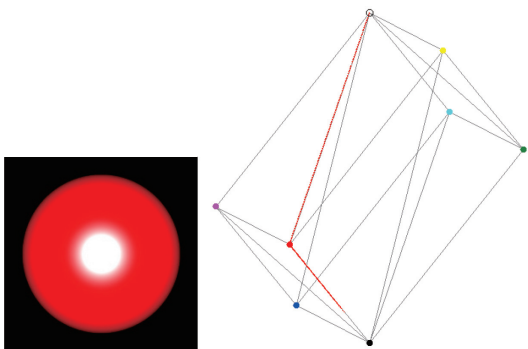
実験 5-1 物体の色(0, 1.0, 0)



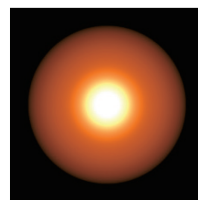
実験 4-2 光源の強さ 20



実験 5-2 物体の色(0, 1.0, 1.0)



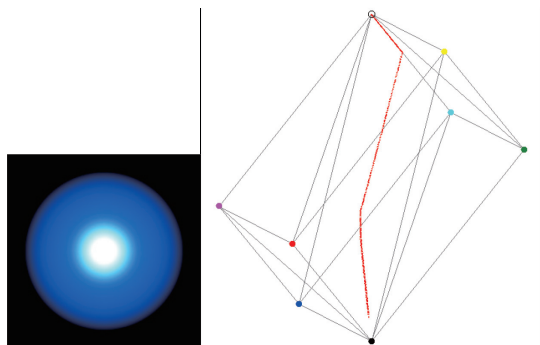
実験 4-3 光源の強さ 30



実験 5-3 物体の色(1.0, 0.5, 0)

このように、光源の強さを変化させても Bk および Wh から折れ曲がり点までは変化はないが、光源が弱くなるほど折れ曲がり点が Bk、Wh に近づくことがわかった。
[数値実験 5 : 物体の色相の影響]

物体の色相を、他の基本色である G(0, 1.0, 0)や C(0, 1.0, 1.0)、また基本色以外の色として(1.0, 0.5, 0)や(0, 0.5, 1.0)にしたときの色の分布を調べる。



実験 5-4 物体の色(0, 0.5, 1.0)

このように、他の基本の色でも、分布の外側の線は、その色と黒、白を繋いだ線になった。また、基本の6色でない色の場合の分布の外側の線は、黒とその色、その色とC,M,Y-Whの軸上の点、軸上の点と白をそれぞれ結んだ線となった。

3.6 色の分布の近似

数値実験結果より、URSモデルにプロットされた点の並びは、物体の色などの条件によって、もっと簡単に表せるのではないかと考えた。そこで、色の分布の近似を考えた。

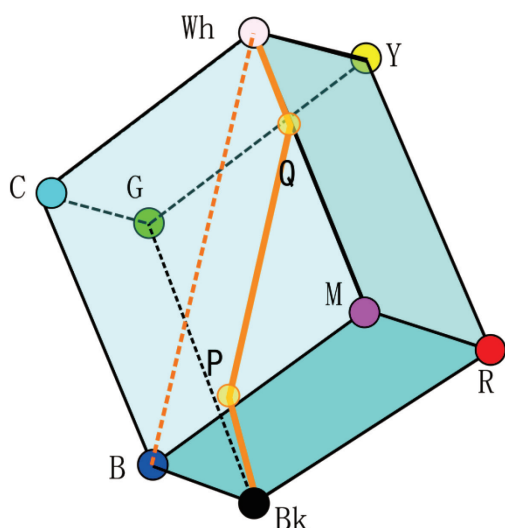


図10 色の分布の近似1

まず、光源が十分に強く、光源方向と視線方向が一致しているとき、基本色とWhで構成される面上の点Pと、C,M,YのいずれかとWhを結んだ边上の点Qを用いて、外側の線をBk-P-Q-Whと表すことができる。

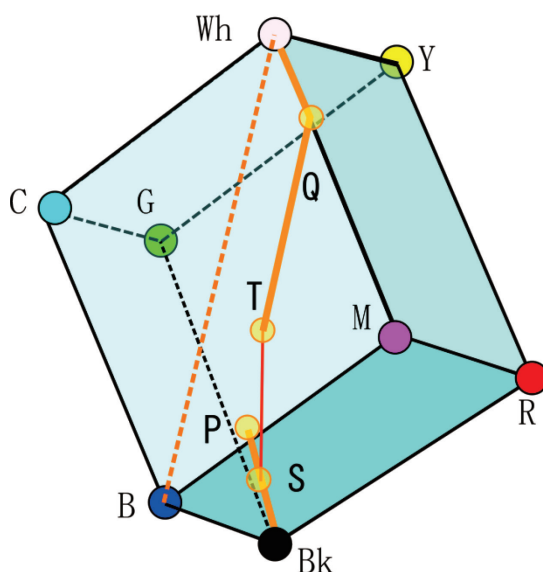


図11 色の分布の近似2

また、内側への折れ曲がり、は、光が十分になかったために拡散反射成分がPの輝度に達することができずに鏡面反射へと切り替わったと考えられる。光源色が白色のとき、Bk-P上の点Sから線は真上に伸び、モデルの上部の面との交点Tからは同様にQ、Whとつながる。このとき、T-Qを結ぶ線は、最大値に達したR,G,BのどれかとWhを結ぶ直線(図ではB-Wh)と平行になる。つまり、QはTが決まれば1つに定まる。またこのTもSの真上でありカラーモデルの面との交点であるため、Sが決まれば1つに決まる。またこのSも、Bk-P軸上にあるため、Pが決まればSの輝度の情報のみで1つに決まる。

この近似方法では、ある輝度を示す線上の点が1つであるため、白黒写真の各輝度の画素にそれぞれ相当する色を当てはめれば、写真の条件さえ合えばカラー化が可能である。つまり、条件のあった白黒写真のカラー化に必要な情報は、Pの座標とSの輝度の情報のみである。

そこで、P を「基準色」、S を「屈折点」と呼ぶことにし、これらの特定を目指す。

3.7 実際の写真での近似の検証

球による理想的なモデルにおいて、色の分布の近似方法が、実際の写真でも成り立つかをつぎの手順で調べた。

- ① 元のカラー画像（図 12）をデジタル処理により一旦モノクロ画像に変換する。
- ② このモノクロ画像の色を URS モデルにプロットする。図 14 の赤い点はその分布である。
- ③ この赤い点の分布を図 14 の青い折れ線で近似する。
- ④ 青い線に従って、モノクロ画像の色を復元し、図 13 が得られる。

図 15～図 17 も同様である。

復元の精度の評価には、カラーモデル内での距離の平均を用いた。

図 12 の写真の復元での平均誤差は 0.0428、図 15 の写真の復元での平均誤差は 0.0274 となった。

このように、写真全体が似た色相である場合、近似式から元の色に大まかに復元することができることがわかった。



図 12 元画像



図 13 近似式からの復元画像

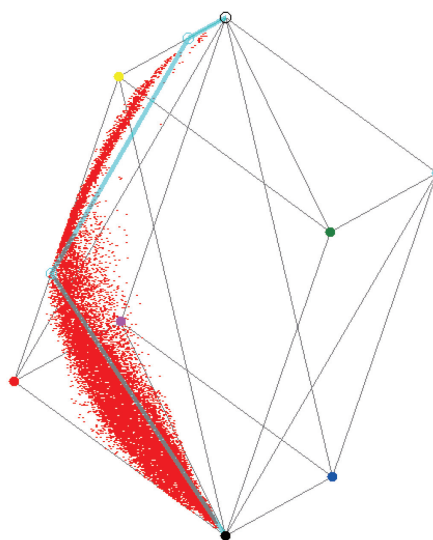


図 14 色分布(赤：元画像、青：近似式)



図 15 元画像

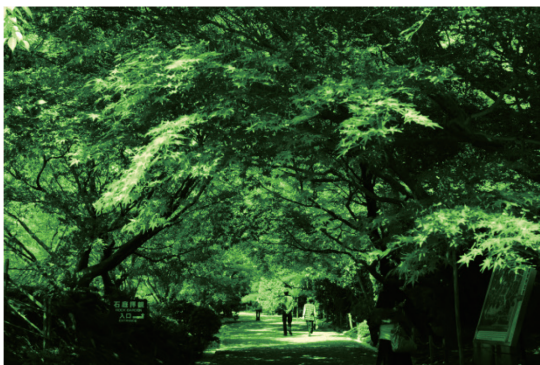


図 16 近似式による復元画像

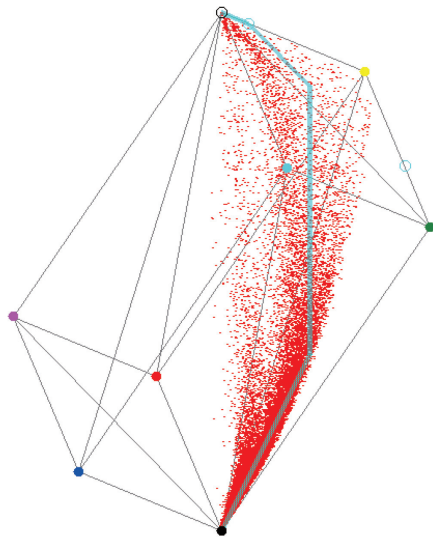


図 17 色分布

3.8 基準色、屈折点の輝度の特定

写真の条件を変えた際、写真全体の明るさや、隣どうしの画素を比べたとき鏡面反射等の明るさの差が大きくなる部分が変化した。そこで、写真全体でそれぞれの輝度を示す「画素数」および「輝度の変化量」を調べれば、基準色や屈折点などの特徴点の輝度が求まるのではないかと考えた。

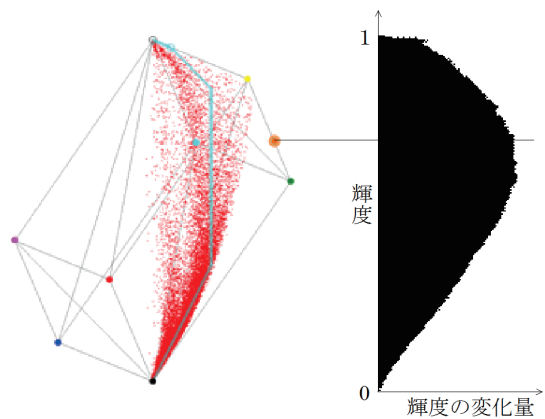


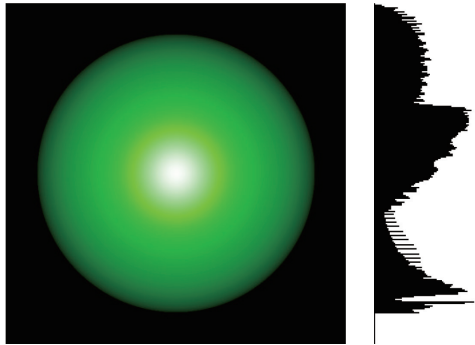
図 18 色分布 (左)

各輝度における輝度の変化量 (右)

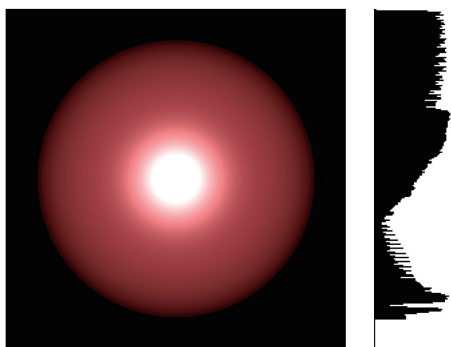
図 18 (右)のように、各輝度での輝度の変化量のヒストグラムでピークを示す輝度は、基準色の輝度と一致し、屈折点は輝度のヒストグラムの中央値と一致する。ただし、理想的なモデルでは輪郭の存在を考慮していないため、現時点では計算による証明はできていない。

3.9 色相の白黒写真への現れ方

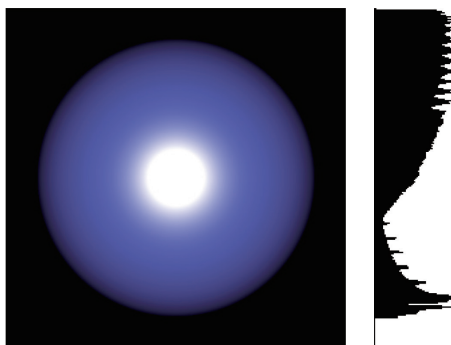
理想的なモデルにおいて、物体の色の基準色の輝度が同じで色相のみが違うとき、画像にどのような違いが現れるかを調べた。



実験 6-1



実験 6-2



実験 6-3

右側のグラフはそれぞれの画像についての、各輝度での輝度の変化量の平均値のグラフである。このように、色相の情報は、ヒストグラムの「形」に現れた。

3.10 同じ色分布の理想的なモデルの特定

色相の特定を行うためには、元の写真に写る物体の色が指定した色相のときの画像が必要であるが、それを得るためには映っている物体の形状を特定しなければならず、白黒写真から色相による差を調べられるほどの精度で立体化することは困難である。

しかし、理想的なモデルのように、単純な画像であれば、CG を用いて計算することは容易である。また、写真内に写る物体の法線ベクトルの分布が球体と同じであれば、光源の向き等の他の条件を合わせれば、色の分布、輝度の分布が元の写真と等しい球体の CG 画像、つまり写真の画素の位置を並び替えて作りえる球体の画像が作れることになる。

よって、このような画像に置き換えた時の、光源方向等の条件の特定を目指す。

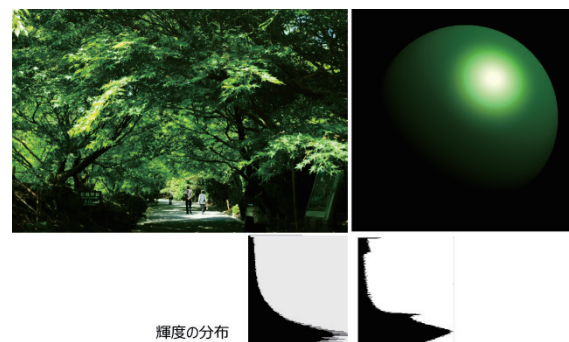


図 19 輝度分布が一致する理想的なモデル

まず、光源の方向についてである。光源の方向を変えると、光源方向が視線方向から離れるほど輝度分布が黒側に偏る。一般的な素材の材質では、鏡面反射の性質はそれほど広範囲では起こらないため、輝度のヒストグラムのピークは、普通、基準色の輝度よりも下、つまり拡散反射の性質の強い部分に現れる。また球体のように法線ベ

クトルの分布が一様な場合、法線ベクトルが視線方向ベクトルと一致する部分の色の面積が最も大きく映るはずである。

よって、輝度のヒストグラムで最大値を示すのは、光源方向と視線方向のなす角を θ とするとき、

$$(\text{基準色の輝度}) \times (\text{光源の強さ}) \times \cos \theta$$

である。また、屈折点について、

$$(\text{屈折点の輝度}) = (\text{基準色の輝度}) \times (\text{光源の強さ})$$

以上より、屈折点、基準色のそれぞれの輝度から光源の方向と強さと求めることができる。

3.11 色相の特定

写真から条件の一致する球体を作り、色相を変化させて「ある輝度での輝度の変化量」のヒストグラムを作り、どの色相で最も元の写真のヒストグラムに近づくかを調べる。

まず、理想的なモデルでは輪郭による輝度の変化を考慮していないため、写真から輪郭での変化を除去する。写真を取り込むときの大きさや映っている物体の大きさによって、全体的な変化量の大きさが変化してしまうため、輪郭部での輝度の変化量は写真によって異なる。そこで、輝度の変化量の度数分布表を作り、平均を下回る変化量の画素は $\left\{ \frac{(\text{その画素での変化量})^2}{(\text{変化量の平均})} \right\}$ 、それ以外は

1.0 を輪郭以外の変化量の割合とし、全ての画素でこの値を記録する。ある輝度での輝度の変化量の平均値を求める際、各画素でのこの割合を用いて重み付き平均としたところ、輪郭部での変化量を除いた、理想的なモデルに近いヒストグラムとなった。



図 20 輪郭以外の変化量の割合

色相の絞り込みは、色相情報が輪につながり循環してしまっているため、簡単な式で値として出すことができない。そこで、基本の 6 色の色相でそれぞれ球体の CG 画像を作り、それぞれの画像と写真とで、輝度の変化量のヒストグラムを比較し、違いを各輝度での値の差の 2 乗値の平均として計算する。6 つのうち最もヒストグラムの形の近いものと、その両隣でより近いものとの間に正しい色相があるとする。これら 2 色を結んだ直線状で物体の色を変化させ、2 分法によって本来の色相の色を求める。

3.12 2 色以上の場合の特定

ここまでは写真全体での基準色が 1 つの場合を扱ってきたが、実際の写真では当然複数色用いられている場合が存在する。写真内の色が 2 色以上使われている場合、現実の色の近い部分ごとに画像を分割し、そ

それぞれで色を特定すればよいと考えた。

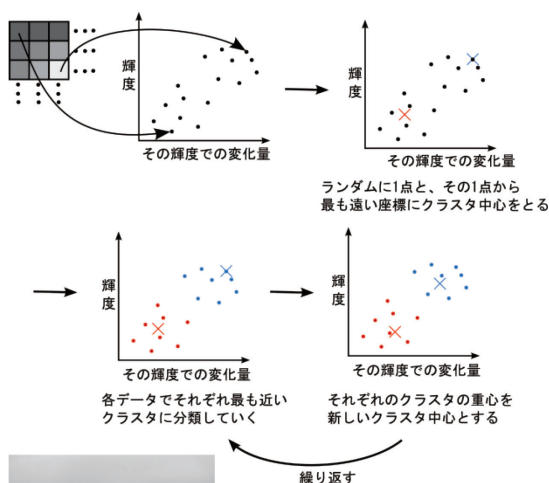


図 21 クラスタリング手順

ここまでの色の特定の際に、「輝度」と「各画素での輝度の変化量」の情報を用いていた。そこで、この 2 つの要素で 2 次元の座標をとれば、各画素が元の色ごとにかたより、分類できると考えた。分類方法には、クラスタリングを用いた。今回用いるクラスタリング手法は、K-means++法を元に高速化を図って独自に開発したものである。

まず、画像内の全画素について、x 軸を「各画素での輝度の変化量」、y 軸を「輝度」とする座標をとる。ランダムに一点をとり 1 つめのクラスタ中心とし、各データについてその点からの距離を計算する。この距離が最も遠い点を新しいクラスタ中心とし、各データをどちらに近いかで分類する。クラスタ中心を 3 点以上にする場合は同様に各データで最も近いクラスタ中心との距離を求め、その距離が最も遠いものを新しいクラスタ中心とした。

次に、各クラスタで属しているデータの座標の重心を求め、そのクラスタのクラスタ中心を重心に更新する。各データで更新さ

れたクラスタ中心でのクラスタを振り直し、重心を求めなおす。この動作をクラスタの割り当てが変わらなくなるまで行う。

こうして求めたクラスタそれぞれに分割して基準の色を求めることで、写真の色分けが可能になった。

しかし、実際の写真では、色は急に変わるのではなく徐々に変わるため、間の色が存在する。そこで、それぞれのクラスタで一旦基準の色を推定し、各画素でそれぞれのクラスタ中心との距離を調べ、その比で色を混ぜることにより表せる。これにより、色の変化がなめらかになり、カラー化した結果が自然な色合いになった。



図 22 サンプル写真

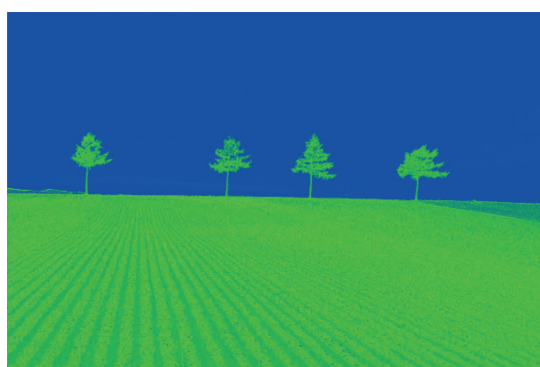


図 23 クラスタリング結果

それぞれのクラスタで基準色を求めると、クラスタ 1 (図中の青い部分) が $(0.298, 0.298, 1.0)$ 、クラスタ 2 (図中の緑の部分) が $(0, 1.0, 0)$ となった。



図 24 カラー化結果



図 25 元画像

4. まとめと今後の課題

今回の研究では、カラー化に必要な情報を絞り込み、また写真を球体という簡単な形に置き換えることで、カラー化の基本の処理ができた。しかし、現時点ではカラー化の成功例が少なく、精度が低い。その原因として、理想的なモデルでの「法線ベクトルが全ての方向に均等に存在する」という条件を写真が十分に満たしていないのではないかと考えている。例えば建物等をとった際には、映っている「面」の向きの法線ベクトルが多くなってしまう。そこで今後は、球体だけでなく、直方体等の法線ベクトルに偏りのある立体も理想的なモデルとしていきたいと考えている。

また、実際の写真から条件の同じ理想的なモデルを求める際、現在は物体の質感を

固定しているため、特殊な材質には対応できない。また、URS モデル内での色の分布の近似には、光源が白色光であるという条件があるため、夕焼け等の写真の再現が正確でない。今後は、このような写真が撮られた時の条件をもっと読み取ることで、より多くの写真に対応できるカラー化手法を開発したいと考えている。

5. 参考文献

レンダラ関係

[1] memoRANDOM

「<http://www35.atpages.jp/shocker/memoRANDOM/CG/contents/LTE1.html>」

[2] BRDFレンダリングの方程式

「<http://www.slideshare.net/todoroki/brdf-28983746>」

画像処理関係

[3] イメージングソリューション

「<http://imagingsolution.net/>」

6. 謝辞

今回の研究を行うにあたり、顧問の米田隆恒先生およびサイエンス研究会のメンバーには多大なご指導を賜りました。また、東北大学の阿部准教授及び「科学者の卵」メンターの方に多大なご意見、ご指摘を賜りました。この場を借りて、深く御礼申し上げます。