画像処理と色空間

(正会員) 平井 経太†

色情報は、画像処理や画像解析において、重要な特徴の1つである。本稿では、まず、撮像による色獲得の原理、デバイスディペンデントカラーとデバイスインディペンデントカラー、三原色と反対色について述べる。続いて、各種色空間の特徴と数値計算の方法を紹介する。最後に、各色空間のカラー画像処理・解析への応用とその性能を示す。

キーワード：三原色、反対色、RGB色空間、CIE色空間、カラー画像処理、カラー画像解析

1. まえがき

人間は、物体表面の反射光または光源からの直接光を網膜上の視細胞により受光し、視神経伝達や脳内情報処理を経て、色を知覚・認識する。外界からの色情報は視覚系における必要不可欠な要素であるとともに、映像メディアの表現や画像の認識において重要な役割をはたす。

色情報は、図1(a)に示されるように、赤・緑・青(Red・Green・Blue)のRGB3次元色空間であらわすことが一般的である*。これは、先に述べた網膜上の視細胞である3種類の錐体(L錐体・M錐体・S錐体)により、人間が色を知覚することに起因する。また、人間は三原色に基づき光を受容した後、反対色に変換し、色を知覚していると考えられている。そのため、三原色だけでなく、図1(b)に示されるような反対色(明度軸・赤-緑軸・黄-青軸)の3次元直交座標系)に基づいた色空間も提案されてきた。

これら色空間の適切な利用は、カラー画像処理・解析に

において重要である。例えば、画像の明るさのみ、または、色味のみを変更したい場合、画像の輝度成分や色相成分のみを抽出し、変換処理を施せばよい。この際、反対色空間を用いれば、RGB色空間に比べ、より直感的な画像処理が可能となる。また、画像や映像の圧縮伝送では、視覚系の色成分への感度が明るさ成分への感度よりも低いという性質を利用し、効率のよい符号化処理を実現している。しかしながら、カラー画像処理研究や技術開発では、色空間の適切な理解と利用が充分でないことも多く、RGB以外の色空間を活用したカラー画像処理は少ない。

本稿では、まず、色空間の基礎である撮像による色獲得の原理、デバイスディペンデントカラーとデバイスインディペンデントカラー、三原色と反対色について述べる。続いて、これまで提案されてきた三原色と反対色に基づく色空間の特徴と数値計算方法について述べる。最後に、各色空間を活用したカラー画像処理・解析として、領域クラスタリング、画像間の色転写、深層学習への適用事例を示す。

2. 色空間の基礎

2.1 撮像による色の獲得

人間が自然界において見ることができる光の波長は380 nm ~ 780 nm までの電磁波である。これを可視光(Visible Light)と呼ぶ。人間はこのようなわずかな光から色と形を推測して自然界を認識しようとしている。このとき、Isaac Newtonの有名な言葉として、「光線には色が付いていない」は重要な指摘である。すなわち、光線(可視光)は電磁波であり、それが視覚系で受光され、脳において色として知覚される。したがって、色の知覚は光の波長分布や物体表面における光反射の仕方でおもに決まるといえる。標準的な人間の視覚系は網膜上に3種類の光受容体(L錐体・M錐体・S錐体)をもつことから、色は3次元空間で表現される。しかしながら、脳レベルにおける色知覚のメカニズムは未だ充分に解明されていない。その一方で、長年培われて

図1 三原色と反対色に基づく色空間

* 印刷などではシアン(C)・マゼンタ(M)・イエロー(Y)の三色と黒(K)を利用するが、本稿ではカラー画像処理を対象とするため、CMYK色空間については言及しない。

† 千葉大学 大学院工学研究院

"Image Processing and Color Spaces" by Keita Hirai (Chiba University, Chiba)

図2 カラー画像における画素値の獲得

きた多くの研究成果や実験データをもとに、光の波長分布から感覚量である色知覚を数値計算するモデルも数多く提案されてきた。

視覚系における色知覚は心理的な効果も影響するが、先に述べたように、そのおおもとは光の分光分布（波長ごとのエネルギー分布）である。これは撮像素子（カメラ等）でも同様であり、カメラ出力（画素値）を得るための撮像素子モデルは以下のように記述できる。

$$\rho_i = \int_{400}^{700} E(\lambda) S(\lambda) T_i(\lambda) R(\lambda) d\lambda + n_i \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布、 $S(\lambda)$ は物体の表面反射率、 $T_i(\lambda)$ は赤外カットフィルタを含むカラーフィルタ透過率、 $R(\lambda)$ はセンサ感度、 n_i はカメラノイズを示す。 i は色チャネル（カラーフィルタ番号）を示し、一般的なカメラはRGBの3チャネルとなる。また、カラーフィルタ透過率とセンサ感度の積 $T_i(\lambda) \times R(\lambda)$ は、カメラ分光感度 $R_i(\lambda)$ として扱われることも多い。上述したように、視覚系は380 nm～780 nmの波長域に感度をもつが、カラー画像獲得においては400 nm～700 nmを可視波長域の積分区間とみなして問題ない。図2に式(1)の模式図を示す。実際のカラー画像プログラミングなどでは、式(1)の撮像素子モデルを以下に示す行列演算により実現する。

$$\rho_i = \mathbf{e}' \mathbf{S} \mathbf{T}_i \mathbf{r} + n_i \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{e}$ と $\mathbf{r}$ はそれぞれ光源分光分布とセンサ感度をあらわす $n \times 1$ の列ベクトル、 $\mathbf{S}$ と $\mathbf{T}_i$ は対角成分がそれぞれ表面反射率とカラーフィルタ透過率をあらわす $n \times n$ の対角行列である。 n は分光分布を離散化した際のサンプル数

であり、[400 nm, 700 nm]の可視光域を5 nm刻みでサンプルした61次元 ($n=61$)、もしくは10 nm刻みでサンプルした31次元 ($n=31$)が多く用いられる。

上述の撮像素子モデルに基づき獲得された画像は、一般に10ビット以上のRAW画像（RAWデータ）として扱われる。市販されているカメラの多くは、RAW画像に、デモザイク（ベイヤー補間）、ノイズ除去、階調補正（ガンマ補正、非線形変換）、色補正（ホワイトバランス補正）、画像圧縮などの処理を施し、8ビットのJPEG画像として保存する。この画像処理工程は、当然、色情報やカラー画素値に影響するため、光学現象や撮像素子モデルを考慮したカラー画像処理を行う場合には、RAW画像を扱うことが望ましい。

2.2 デバイスインディペンデントカラーとルータ条件

式(1)でモデル化されたカメラRGB値は、カメラ分光感度 $R_i(\lambda)$ が異なれば、それに応じて値も変化する。言い換えれば、撮像素子の特性に依存したRGB値であり、これをデバイスディペンデントカラー（Device Dependent Color）と呼ぶ¹⁾。一般的なRGB画像はデバイスディペンデントカラーであり、まったく同じ光源環境下と撮影ジオメトリで同一物体を撮影した場合でも、カメラが変われば、撮影画像の明るさや色味が異なってしまう。そのため、デバイスディペンデントカラーのRGB画像を処理する際には、撮影デバイス（または表示デバイス）の色特性にあわせた画像処理やパラメータ調整が必要となる。

デバイスディペンデントカラーはRGB画像の明るさや色味がデバイス依存となり、正確な色情報が必要であるカラー画像処理や色再現処理において不都合が生じる。そのため、正確な色情報を扱う際には、デバイス依存しないデ

図3 カメラ分光感度と等色関数

バイスインディペンデントカラーが必要となる。デバイスインディペンデントカラーとしては、CIE（国際照明委員会）が定めた色空間²⁾であるCIEXYZ表色系やCIEL*a*b*表色系が標準的に用いられる。CIEXYZ表色系におけるXYZ三刺激値は、式(1)のカメラ分光感度 $R_i(\lambda)$ を等色関数（視覚系の分光感度に対応する関数）に置き換え、正規化することで定義できる（CIEL*a*b*表色系の詳細は3章を参照）。

デバイス依存であるカメラRGB値とデバイス非依存なXYZ三刺激値はともに式(1)に由来するため、それらの変換は、ルータ条件と呼ばれる式(3)を満たす変換行列 $\mathbf{M}_{3 \times 3}$ により実現できる。

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \bar{r}_{cam}(\lambda) \\ \bar{g}_{cam}(\lambda) \\ \bar{b}_{cam}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{もしくは, } \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} R_{cam} \\ G_{cam} \\ B_{cam} \end{bmatrix}$$

ここで、 $\bar{r}_{cam}(\lambda)$ 、 $\bar{g}_{cam}(\lambda)$ 、 $\bar{b}_{cam}(\lambda)$ は式(1)の $R_i(\lambda)$ に相当するカメラ分光感度、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数、 R_{cam} 、 G_{cam} 、 B_{cam} はカメラRGB値、 X 、 Y 、 Z はXYZ三刺激値である。参考として、図3にカメラ分光感度の一例と等色関数を示す。ルータ条件を満たす変換行列 $\mathbf{M}_{3 \times 3}$ はカメラ固有であり、カメラRGBからXYZ三刺激値に変換する必要がある場合には、カメラごとに変換行列を求めなければいけない。しかしながら、実際のカメラではルータ条件を満たせず、変換行列を定められないことが多い。そのため、カメラのカラーチャネル数を4つ以上に増やしたマルチバンドカメラにより、正確な色情報を獲得する試みも行われている³⁾⁴⁾。

また、sRGB画像¹⁾⁵⁾やAdobe RGB画像⁵⁾⁶⁾などの標準的な色空間で定義されたRGB画像ならば、CIEXYZ表色系に変換することが可能である。ここでは、ディスプレイやプリンタをはじめとする多くの映像機器に採用されているsRGBからXYZ三刺激値への変換式を示す。

図4 色覚の段階説

図中の+・-は、加算・減算を示す。三原色(RGB, CIEXYZ, LMS 錐体応答値など)から反対色を構成する方法はさまざま提案されており(3章参照)。模式図はあくまでも一例(例えば、後述の $1\alpha\beta$ 色空間)である。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9504 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sRGB}(R_{sRGB}) \\ f_{sRGB}(G_{sRGB}) \\ f_{sRGB}(B_{sRGB}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$f_{sRGB}(C) = \begin{cases} ((C + 0.055) / 1.055)^{2.4} & (C \geq 0.04045), \\ C / 12.92 & (\text{otherwise}). \end{cases}$$

ここで、 R_{sRGB} 、 G_{sRGB} 、 B_{sRGB} はsRGB画像の画素値([0, 1]の範囲)であり、関数 f_{sRGB} はRGB値の線形化処理を示す。RGB画像をCIEXYZ表色系に準拠する色空間で処理したい場合、上記のsRGB画像を仮定した色変換を施すことが多い。

なお、CIERGB表色系に基づくRGB三刺激値も存在する。このRGB三刺激値はカメラRGBやsRGBとは異なるので注意が必要であるが、カラー画像処理においてCIERGB表色系を利用することはほとんどない。

2.3 三原色と反対色

人間の色覚は、ヤング＝ヘルムホルツの三色説(1802年～1850年頃)とヘーリングの反対色説(1878年、四色説とも呼ばれる)の2つの仮説が主となり議論されてきた。三色説と反対色説はそれぞれ経験的事実に基づいて提案されたものであり、両者ともさまざまな色彩感覚を矛盾なく説明できるため、どちらが視覚系で実際に起こっている現象なのかを判断できなかった。その後、網膜上の錐体により三原色に基づき受光し、それらを反対色の信号に変換して色を知覚するという段階説(図4)が提唱され、現在のところ最も有力な説とされている。

カラー画像処理においても、上記の色覚モデルに基づき、三原色または反対色で構成される色空間を用いることが一般的である。なお、色の三属性(色相・明度・彩度)に基づく色空間も提案されているが、カラー画像処理では反対色の赤-緑軸と黄-青軸の直交座標系を、色相と彩度の極座標系に変換することで、色の三属性に対応する場合が多く、本稿では色相・明度・彩度の色空間を用いるカラー画像処理の説明は割愛する。

3. 画像処理に用いられる色空間

3.1 色空間の概要

上述したとおり、カラー画像処理における色空間は、デ

バイスディペンデントカラーとデバイスインディペンデントカラー、三原色と反対色のどちらを扱っているかに注意しなければならない。しかしながら、多くのカラー画像処理アルゴリズムは色空間への配慮がなされておらず、デバイスディペンデントなRGB値を暗に前提としている。そのため、カラー画像や色情報の不適切な処理が施されている事例も発生している。そこで、次節以降では、各種色空間の概要と計算式について述べる。

なお、近年では、CIECAM⁷⁾ (最新版のCIECAM16が2018年中に勧告予定である) やiCAM^{8) 9)} などのColor Appearance Model (CAM: 色の見えモデル) に基づく画像処理も提案されている^{10) ~12)}。CAMは、視覚系の色順応や非線形応答特性、視環境の周囲条件などを考慮することで、人間の色知覚を適切に計算できるモデルである。一方、視環境に関するパラメータ設定を必要とするなど、カラー画像処理に適していない側面も持つ。CAMを用いたカラー画像処理の主目的が画像や映像の忠実な色再現であることや、その計算過程が複雑であることから、本稿では説明を割愛する。

また、マンセル表色系、NCS (Natural Color System)、PCCS (Practical Color Co-ordinate System) など、顕色系と呼ばれる色空間も提案されている。これらは、色知覚の心理的な三属性 (色相・明度・彩度) に基づいて感覚的に等間隔になるよう色が配列されており、美術やデザイン分野で広く利用されている。顕色系は人間の感覚量と非常に近いという利点があるが、一方、デジタル値として扱うことが非常に困難である。そのため、顕色系を用いたカラー画像処理はほとんど存在しない。

3.2 デジタル画像におけるRGB値と反対色空間

まずは、インターネットやスマホなどで獲得された一般的なデジタル画像の処理を想定する。この場合、RGB値の多くは、カメラ内部でさまざまな処理が施された後にJPEG圧縮されたデジタル値であり、物理的な正確さをほとんど持たない。しかしながら、扱いの容易さから、カラー画像処理アルゴリズムの多くが、このRGB値を無意識のうちに想定している。

一般的なデジタル画像はRGBの3次元色空間で処理されるため、人間の色彩感覚に適していない色情報処理がなされることもある。そこで、デジタル画像のRGB値から反対色へ変換し、輝度成分または色差成分 (反対色成分) のみを変調する画像処理も多い。以下では、一般的なデジタル画像処理で利用される反対色空間について述べる。

(1) YIQ色空間

カラー画像処理の反対色空間として、放送用の映像信号として用いられているYIQやYUV、JPEG圧縮で用いられているYCbCrなどがあげられる。これらの反対色空間は輝度信号Yと、2つの色差信号 (反対色軸) を使って表現される色空間である。人間の視覚系が輝度信号よりも色差信号

への感度が低いという性質をもとに、色差信号を圧縮することで、効率的な情報転送を実現している。YIQ色空間は、もともとNTSCで定義されたデバイスインディペンデントカラーであるが、輝度信号や反対色への分離が人間の感覚と比較的あっていることから、一般的なデジタル画像処理にも利用されている。以下に、RGBからYIQへの変換式を示す。

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (5)$$

ここで、入力RGBは[0, 1]である。変換行列からもわかる通り、出力YIQはそれぞれ[0, 1], [-0.596, 0.596], [-0.523, 0.523]の範囲をとり、I成分とQ成分はそれぞれRとG+B (シアン系)、R+B (マゼンタ系) とGの反対色軸となる。

(2) I₁I₂I₃色空間

上記のYIQなどは、人間の色彩感覚を比較的正しく表現できる反対色空間であるが、コンピュータビジョンやパターン認識などの研究分野では、よりシンプルかつ効果的とされるI₁I₂I₃反対色空間もたびたび用いられる^{13) 14)}。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \\ -1/4 & 1/2 & -1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式(6)の変換行列からもわかる通り、輝度信号はRGBの平均値、反対色成分は(R-B)と(2G-R-B)により表現される。

(3) oRGB色空間

oRGB色空間は、コンピュータグラフィックスなどの視覚的な表現や見えを重視する画像処理のために開発された反対色空間である¹⁵⁾。一般的なデジタル画像のRGB値を想定しており、画像の色補正などを行う際に効果的である。oRGB色空間への変換は、まず、RGB値を式(7)により反対色空間 (L: 輝度軸, C₁: R+G-B軸, C₂: R-G軸) に変換する。

$$\begin{bmatrix} L \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.500 & 0.500 & -1.000 \\ 0.866 & -0.866 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (7)$$

次に、人間の色彩感覚にあわせるために、反対色平面 (色相面) 上でC₁C₂値を回転させ、青領域を圧縮する。これにより、oRGB色空間を構成するL C_y C_{rg}値が得られる。

$$\begin{bmatrix} C_{yb} \\ C_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0 - \theta) & -\sin(\theta_0 - \theta) \\ \sin(\theta_0 - \theta) & \cos(\theta_0 - \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\theta = \text{atan2}(C_2, C_1),$$

$$\theta_0 = \begin{cases} (3/2)\theta & (\theta < \pi/3), \\ \pi/2 + (3/4)(\theta - \pi/3) & (\pi/3 \leq \theta \leq \pi). \end{cases}$$

3.3 CIE表色系

CIE表色系²⁾は、先にも述べた通り、CIE(国際照明委員会)が定めた色空間である。人間の網膜応答や色覚特性に基づいて設計されており、色を心理物理量などの定量的な値として扱えることから、デバイスインディペンデントカラーとして産業界に広く利用されている。カラー画像処理においては、CIEXYZ表色系とCIEL*a*b*表色系を用いることが多く、ここでは両表色系を中心に説明する。

(1) CIEXYZ表色系

CIEXYZ表色系は、1931年に勧告された色空間であり、式(1)のカメラ分光感度 $R_i(\lambda)$ を等色関数、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ に置き換えることで、XYZ三刺激値に相当する値が得られる。XYZはおおむねRGBに相当し、三原色に基づく色空間といえる。また、緑色に相当するY値は輝度[cd/m²]の計算にも用いられる。

上述したとおり、物理量である光の分光分布から心理物理量であるXYZ三刺激値への変換は、線形演算により実現できる。XYZ三刺激値の具体的な求め方としては、式(1)～式(4)に示される通り、方法①カメラ入射光の分光分布に等色関数をかける、方法②ルータ条件を満たす変換行列をカメラRGBに適用する、方法③sRGBやAdobe RGBを仮定する、などがあげられる。

(2) CIEL*a*b*表色系

CIEL*a*b*表色系(またはCIELAB色空間)は、XYZ三刺激値を基盤に、色彩感覚の均等性を目指した均等色空間である。 L^* 、 a^* 、 b^* はそれぞれ明度($L^*=0$:黒, 100:白)、赤-緑軸(a^* の正值:赤, 負値:緑)、黄-青軸(b^* の正值:黄, 負値:青)に対応し、反対色に基づく色空間となる。画質評価などでも用いられる色差 ΔE^*_{ab} は、Lab色空間内における2点間のユークリッド距離で定義される。以下に、XYZ三刺激値から $L^*a^*b^*$ 値への変換式を示す。

$$\begin{bmatrix} L^* \\ a^* \\ b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 116 & 0 & -16 \\ 500 & -500 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & -200 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{Lab}(X/X_n) \\ f_{Lab}(Y/Y_n) \\ f_{Lab}(Z/Z_n) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$f_{Lab}(t) = \begin{cases} t^{1/3} & (t > 0.008856), \\ 7.7871t + 16/116 & (otherwise). \end{cases}$$

ここで、 X_n 、 Y_n 、 Z_n は標準光源下における完全拡散反射面(標準白色)の三刺激値(D65光源下では $(X_n, Y_n, Z_n) = (95.05, 100, 108.89)$)である。 $L^*a^*b^*$ 値は、標準白色で正規化されたXYZ三刺激値を非線形変換(1/3乗)することで得られるが、これは人間の感覚量は刺激量の対数に比例する(ヴェーバー・フェヒナーの法則などと呼ばれる)ことに由来する。

(3) その他のCIE表色系

他のCIE表色系としては、CIERGB表色系やCIE $L^*u^*v^*$ 表色系が存在する。CIERGB表色系は、上述したように、

カメラRGBやsRGBなどとは異なるので注意が必要である。CIE $L^*u^*v^*$ 表色系は、CIEXYZ表色系の色差均等性を向上させた色空間である。JISでも規定されており、色管理の現場などでも利用されている。しかしながら、これらの表色系(色空間)がカラー画像処理で利用されることはほとんどない。また、CIE表色系ではないが、RLABと呼ばれるCIELABを改善した均等色空間¹⁶⁾も画像処理に稀に利用される。しかしながら、現在では後述するIPT色空間に取って代わられることが多い。

3.4 LMS錐体応答に基づく反対色空間

YIQとCIE $L^*a^*b^*$ の反対色空間は、それぞれRGBのデジタル画像での扱いが容易であることや、心理物理量であるXYZ三刺激値から算出される均等色空間であるため、カラー画像処理では広く用いられている。一方、人間の色知覚メカニズムに関する研究や色覚の数値モデル化は現在も発展中であり、人間の感覚を模した反対色空間が今なお提案されている。これらの反対色モデルは、色知覚の根源であるLMS錐体の三原色から変換されることが多い。XYZ三刺激値からLMS錐体応答値への変換式も数多く提案されているが^{17) 18)}、ここではCIECAMにも採用されているHunt-Pointer-Estevézの変換行列 $\mathbf{M}_{\text{HPT}}$ とCAT02の変換行列 $\mathbf{M}_{\text{CAT02}}$ を示す^{19) 20)}。

$$\mathbf{M}_{\text{HPT}} : \begin{bmatrix} L_{\text{HPT}} \\ M_{\text{HPT}} \\ S_{\text{HPT}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_{\text{CAT02}} : \begin{bmatrix} L_{\text{CAT02}} \\ M_{\text{CAT02}} \\ S_{\text{CAT02}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (11)$$

参考として、図5に式(10)および(11)の変換行列を用いて得られた錐体応答関数を示す。目的によっては上記と異なる変換行列を用いることもあるので、実際にRGB画素値をLMS錐体応答値に変換する際には注意が必要である。ここからは、LMS錐体応答の三原色から色知覚に基づいた反対色への具体的な変換方法について述べる。

(1) 色覚研究で用いられる反対色空間

LMS錐体応答の三原色から反対色への変換は、式(12)により実現する方法が最も単純である。

$$\begin{bmatrix} L+M \\ L-M \\ S-(L+M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}. \quad (12)$$

ここで、 $L-M$ と $S-(L+M)$ はおおよそ赤-緑軸、青-黄軸に相当する。また、色覚研究ではこれを改良したDKL色空間がたびたび利用される²¹⁾。

(2) O₁O₂O₃色空間

Wandellらは、矩形波で構成されるカラー縞画像を用いて、色識別(色弁別)の実験を行った。この実験結果をもと

図5 錐体応答関数の例

に、画像の空間周波数パターンに対して視認性が良い反対色空間を定義した^{22) 23)}。

$$\begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ O_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.59 & 0.80 & -0.12 \\ -0.34 & -0.11 & 0.93 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}. \quad (13)$$

ここで、 O_1 は輝度軸に、 $M-(L+S)$ で張られる O_2 と $S-(L+M)$ で張られる O_3 は、それぞれ緑-赤軸と青-黄軸に相当する。 $O_1O_2O_3$ 色空間は縞画像における色視認性をもとに構築されたこともあり、後にS-CIELABと呼ばれる視覚系の空間周波数特性を考慮した画質評価手法に応用された²⁴⁾。

(3) IPT色空間

IPT色空間は視覚の非線形応答を考慮することで、CIELAB色空間よりも優れた均等性をめざして構築された反対色空間である²⁵⁾。以下にIPT色空間への変換式を示す。

$$\begin{bmatrix} I \\ P \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.400 & 0.400 & 0.200 \\ 4.455 & -4.851 & 0.396 \\ 0.806 & 0.357 & -1.163 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{IPT}(L) \\ f_{IPT}(M) \\ f_{IPT}(S) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$f_{IPT}(C) = \begin{cases} C^{0.43} & (C \geq 0), \\ -(-C)^{0.43} & (C < 0). \end{cases}$$

ここで、 I 、 P 、 T の各成分はそれぞれ明度、赤-緑軸、黄-青軸に対応する。IPT色空間はCIELAB色空間の改善を目指して提案されたこともあり、両色空間はたびたび比較されるが、均等色空間や色差計算の面でIPT色空間の性能は優れていると言われている。そのため、HDR画像のトーンマッピング⁹⁾、画像の色域圧縮(ガマットマッピング)、映像機器の色管理などに利用されている。また、近年では、Dolby Laboratoriesが、IPT色空間を改良したITP色空間を提案し、HDR画像の表示や圧縮へ応用している²⁶⁾。

(4) $l\alpha\beta$ 色空間

$l\alpha\beta$ 色空間は、自然画像に対するLMS錐体応答値(対数変換後)を主成分分析することで、統計的に直交するように設計された反対色空間である²⁷⁾。

$$\begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log S \end{bmatrix}. \quad (15)$$

ここで、 l 、 α 、 β の各成分はそれぞれ明度、黄-青軸、赤-緑軸に対応する。 $l\alpha\beta$ 色空間は、もともと反対色に関する視覚特性を理解するために提案されたが、Reinhardらが後述の色転写²⁸⁾で採用して以来、カラー画像処理にもたびたび利用されている。

(5) Matrix-R理論に基づく反対色空間

視覚系に入射する分光分布は、LMS錐体応答を得て情報削減される。Cohenは、Matrix-R理論と呼ばれる手法により、分光空間から視覚空間への射影を数学的に記述した²⁹⁾。Matrix-R理論に基づく色空間は、視覚空間における分光分布の正規直交性を保つことができる。この正規直交基底は、一般に有彩色と無彩色を示すことが多く、反対色空間となる。CIEXYZ表色系からMatrix-R理論に基づく色空間への線形変換も幾つか提案されているが^{29) 30)}、ここではKoteraが提案した変換行列を示す³¹⁾。

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_R \\ C_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.26534 & 0.44199 & 0.29267 \\ 1.02357 & -0.50407 & -0.51950 \\ 0.86424 & -1.08972 & 0.22549 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (16)$$

ここで、 Y 、 C_R 、 C_B はそれぞれ輝度軸、赤-緑軸、青-黄軸に対応する。なお、本理論はLMS錐体応答を分光的に記述した正規直交空間という概念に基づいているが、上述のようにLMS錐体応答のモデル式は数多く提案されているため、本稿では直交空間の信頼性を保つ計算が可能な変換方法を式(16)に記述した。

4. 色空間のカラー画像処理応用

ここまで、カメラRGB値の獲得原理から各色空間への変換方法について述べた。本章では、各色空間の画像処理への適用例を紹介する。なお、異なる色空間を利用しても、使用画像や処理アルゴリズムによっては、結果が類似する。本章では、これまでに紹介した色空間すべての結果は割愛し、代表的な結果のみを示す。また、デバイスインディペンデントカラーであるXYZ三刺激値に基づく色空間を利用する際には、sRGB画像を仮定した。

4.1 反対色成分の抽出

図6に画像の反対色成分の抽出性能を示す。なお、反対色成分のみの画像は、非常に暗く視認性が悪いいため、図6の画像は明るさ補正がなされている。また、反対色成分の直交性(赤-緑、黄-青軸への対応)を視覚的に比較しやすくするため、一部の画像は色相回転を加えている。

図6に示される通り、oRGB色空間やMatrix-Rに基づく色空間は、赤-緑軸と黄-青軸を比較的精度良く再現できている。特に、oRGB色空間はデバイスディペンデントカ

図6 各色空間での反対色成分

ラーにも関わらず、比較的良好な反対色抽出が可能である。なお、図6の画像の見えるは、ディスプレイやプリンタに大きく依存するため、視環境によっては見えの違いがほぼない可能性もあるので注意されたい。

4.2 領域クラスタリング

図7にK-means法による領域クラスタリングの結果を示

図7 K-meansによる領域分割

す。ここでは、事前処理として、バイラテラルフィルタによる平滑化処理を行っている。また、クラスタ結果の画像は各クラスターの平均色を用いて表示している。図7に示される通り、CIELAB色空間は比較的に人間の感覚にあった領域分割ができている。一方、YIQ色空間を用いた場合、境界領域が複雑に入り組んでおり、誤分割と判断できる箇所が複数生じる結果となっている。

他の領域分割の例として、Khattabらはインタラクティブな領域抽出手法であるGrabCutアルゴリズムを用いて、前景物体検出における各色空間の性能を検証した³²⁾。その結果、RGB色空間に基づく前景検出が最も優れているという結果を導き出している。このように、領域分割アルゴリズムによっては、通常のRGB空間でも高い精度を発揮する

図8 画像間の色転写

場合があるので、色空間の利用には充分注意が必要である。

4.3 画像間の色転写

画像間の色転写 (Color Transfer) における各色空間の性能を示す。ここでは、Reinhardらが提案した色転写アルゴリズムを用いる²⁸⁾。このアルゴリズムは、反対色空間での平均値と標準偏差を利用した簡易かつ効果的な色転写手法である。

$$c_o = (\sigma_r / \sigma_s)(c_s - \mu_s) + \mu_r \quad (17)$$

ここで、 c は反対色空間における各成分の値、 μ は平均値、 σ は標準偏差である。 s は入力画像 (source)、 r は参照画像 (reference)、 o は出力画像 (output) を示している。Reinhardらのオリジナル手法では、反対色空間として $l\alpha\beta$ 色空間を採用していた。

Bratkovaらの実験画像¹⁵⁾を用いた色転写結果を図8に示す。もともと、Reinhardらは類似した2つのシーン画像を想定し、色転写を行っていた。このような類似シーン間では、 $l\alpha\beta$ 色空間も優れた色転写性能を示している。一方、Bratkovaによる実験では、雰囲気異なる画像間での色転写を行っており、このような場合では、図6に示されるような反対色抽出性能が高い $oRGB$ 色空間が有効であると考えられている。

また、Reinhardらは、式 (17) の色転写アルゴリズムを提案した後に、各色空間の有効性を検証した³³⁾。その結果、CIELAB色空間が各軸の独立性 (軸間が無相関) という点で色転写に優れていることを示している。

4.4 色空間と深層学習

最後に、現在広く利用されている深層学習と色空間との関係について記載する。まず、深層学習を用いた物体認識における色空間の性能について述べる。図9に10クラスか

ら成るCIFAR-10画像データセット³⁴⁾を用いた際の各色空間における認識性能 (混同行列: Confusion Matrix) を示す。性能検証では、畳み込みニューラルネット (Convolutional Neural Net: CNN) で広く利用されているツールCaffeを用いて、学習・識別が行われた。各色空間の性能検証に用いるCNNの学習パラメータはすべて同一条件である。

図9に示される通り、RGB色空間のほうがCIELAB色空間よりも僅かながら高い識別性能を示している。また、輝度画像 (Y成分) のみでも検証した結果、正解率はRGB (76.0%) > Yのみ (74.9%) > CIELAB (71.9%) の順となった。CNNの結果はパラメータ設定に依存するが、物体認識では色と同様に形態も重要とされることや、CNNの畳み込み層に反対色に相当するフィルタ³⁴⁾が存在することなど、色空間の差異が生じにくいという見方もある。

深層学習に関する物体認識アルゴリズムはまだ発展段階であり、色空間の特性を考慮した設計が今後行われる可能性もある。そのため、視覚特性を考慮した反対色空間がRGB空間よりも優れた識別性能を示すことも今後予想される。また、深層学習 (CNN) は、画像の見えに関する処理を目的とした絵画の筆蹟転写³⁵⁾や色復元 (Colorization)^{36)~38)}にも応用されている。図10に示される通り、CNNを用いたモノクロ画像からの色復元においては、反対色空間であるCIELAB色空間が視覚的に良い色復元性能をもつと考えられている。

5. むすび

本稿では、カラー画像処理で用いられる色空間について概説した。まず、カメラによる色獲得の原理と画像処理に

図9 CNNによる物体認識

図10 CNNによるモノクロ画像のColorization³⁶⁾

において重要な色空間の基礎(デバイスディペンデントカラーとデバイスインディペンデント、三原色と反対色)について説明した。続いて、色空間の特徴と計算方法を説明し、最後に各色空間の画像処理への適用例を紹介した。

画像処理への適用例で示した通り、画像の見えを重要とする処理やCG表現などにおいては、反対色の分離性能が高い色空間を用いると望んだ結果を得られることが多い。一方、コンピュータビジョンや物体認識では、RGB色空間でも十分な性能を示すことがある³⁹⁾。これは、そもそもRGB色空間以外が考慮されておらず、色空間の特性を活かしたアルゴリズム開発が行われていないとも言える。コンピュータビジョン分野における色空間の性能やアルゴリズムへの依存性に関する検証は、今後の課題である。

本稿で紹介した色空間以外にもさまざまな色空間が提案されている^{40) 41)}。また、視覚工学や色彩工学の研究分野では、色覚メカニズムの解明と新たな色空間の開発が今なお進められている。画像処理の目的やアルゴリズムに応じた色空間の適切な利活用が重要であるとともに、画像処理における色空間の性能評価も求められる。それらを考慮したカラー画像の処理・解析・再現・評価研究が今後も発展することを期待したい。

謝辞 CNNによるColorizationの図面に関して、早稲田大学大学院・飯塚里志先生にご協力いただきました。ここに深く感謝いたします。(2017年2月28日受付)

〔文 献〕

- 1) 画像電子学会編、河村尚登、小野文孝監修：“カラーマネジメント技術”，東京電機大学出版局（2008）
- 2) 大田登：“色彩工学”，東京電機大学出版局（1993）
- 3) 三宅洋一編：“分光画像処理入門”，東京大学出版会（2006）
- 4) S. Tominaga: "CIC@20: Multispectral imaging", CIC, pp.177-184（2012）
- 5) S. Susstrunk et al: "Standard RGB color spaces", CIC, pp.127-134（1999）
- 6) Adobe Systems Incorporated: "Adobe RGB（1998） color image encoding", Technical report（May 2005）
- 7) N. Moroney et al: "The CIECAM02 color appearance model", CIC, pp.23-27（2002）
- 8) M.D. Fairchild et al: "The iCAM framework for image appearance, image differences and image quality", J. Elect. Imag., 13, 1, pp.126-138（2004）
- 9) J. Kuang et al: "iCAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering", J. Vis. Commun. Imag. Repres., 18, 5, pp.406-414（2007）
- 10) M.H. Kim et al: "Modeling human color perception under extended luminance levels", ACM TOG (SIGGRAPH), 28, 3, pp.27:1-27:9（2009）
- 11) T. Kunkel et al: "A neurophysiology-inspired steady-state color appearance model", JOSA A, 26, 4, pp.776-782（2009）
- 12) E. Reinhard et al: "Calibrated image appearance reproduction", ACM TOG (SIGGRAPH Asia), 31, 6, pp.201:1-201:12（2012）
- 13) Y. Ohta et al: "Color information for region segmentation", Comput. Graph. Image. Process., 13, 3, pp.222-241（1980）
- 14) R.T. Collons et al: "On-line selection of discriminative tracking features", IEEE PAMI, 27, 10, pp.1631-1643（2005）
- 15) M. Bratkova et al: "oRGB: A practical opponent color space for computer graphics", IEEE CG&A., 29, 1, pp.42-55（2009）
- 16) M. Fairchild: "Refinement of the RLAB color space", CRA, 21, 5, pp.338-346（1996）
- 17) V.C. Smith et al: "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm", Vision Res., 15, 2, pp.161-171（1975）
- 18) A. Stockman et al: "Spectral sensitivities of the middle- and longwavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype", Vision Res., 40, 13, pp.1711-1737（2000）
- 19) N. Moroney et al: "The CIECAM02 color appearance model", CIC, pp.23-27（2002）
- 20) C Li et al: "CAT02 and HPE Triangles", CRA, 40, 1, pp.30-39（2015）
- 21) D.H. Brainard: "Cone contrast and opponent modulation color spaces", in Human Color Vision (2nd ed.) , Optical Society of America, pp.563-579（1996）
- 22) A.B. Poirson et al: "The appearance of colored patterns: Pattern-color separability", JOSA A, 10, 12, pp.2458-2470（1993）
- 23) B.A. Wandell, Foundations of Vision, Sinauer Associates Inc.（1995）
- 24) X. Zhang et al: "A spatial extension of CIELAB for digital color-image reproduction", SID Symp., pp.61-63（1997）
- 25) F. Ebner et al: "Development and testing of a color space (IPT) with improved hue uniformity", CIC, pp.8-13（1998）
- 26) T. Lu et al: "Adaptive reshaper for high dynamic range and wide color gamut video compression", Proc. SPIE, 9971, pp.99710B:1-99710B:14（2016）
- 27) L. Daniel et al: "Statistics of cone responses to natural images: Implications for visual coding", JOSA A, 15, 8, pp.2036-2045（1998）
- 28) E. Reinhard et al: "Color transfer between images", IEEE CG&A., 21, 5, pp.34-41（2001）
- 29) J.B. Cohen: "Visual Color and Color Mixture - Fundamental Color Space", Illinois Press（2001）
- 30) S.A. Burns et al: "The Munsell color system in fundamental color space", CRA, 15, 1, pp.29-51（1990）
- 31) H. Kotera: "A complete opponent-color space with golden vectors", CIC, pp.65-70（2014）
- 32) D. Khattab et al: "Color image segmentation based on different color space models using automatic GrabCut", the Scientific World Journal, pp.126025:1-126025:10（2014）
- 33) E. Reinhard et al: "Colour spaces for colour transfer", CCIW, pp.1-15（2011）
- 34) A. Krizhevsky et al: "Imagenet classification with deep convolutional neural networks", NIPS, pp.1106-1114（2012）
- 35) L.A. Gatys et al: "Image style transfer using convolutional neural networks", CVPR, pp.2414-2423（2016）
- 36) S. Iizuka et al: "Let there be color!: Joint end-to-end learning of global and local image priors for automatic image colorization with simultaneous classification", ACM TOG (SIGGRAPH), 35, 4, pp.110:1-110:11（2016）
- 37) R. Zhang et al: "Colorful image colorization", ECCV, pp.649-666（2016）
- 38) G. Larsson et al: "Learning representations for automatic colorization", ECCV, pp.577-593（2016）
- 39) T. Gevers et al: "Color in Computer Vision - Fundamentals and Applications", Wiley-IS&T（2012）
- 40) M.D. Fairchild: "Color Appearance Models", 3rd ed., Wiley-IS&T（2013）
- 41) E. Reinhard et al: "Color Imaging - Fundamentals and Applications", CRC Press（2008）

ひらい けいた 平井 経太 2010年、千葉大学大学院融合科学研究科博士後期課程修了。現在、千葉大学大学院工学研究科助教。カラー画像計測、解析、処理、再現、評価などの一連のイメージングプロセスに関する研究に従事。また、近年は分光イメージングシステムや質感画像工学に注力している。博士(工学)、正会員。