

光と色の計測と表現 ーコンピュータビジョンの観点からー

富永昌治[†]

デジタルイメージング技術の最近の進歩と普及は、単に画像の獲得を容易にするのみならず、従来の計測器ではできなかった、光源の分光情報や物体表面の分光反射率といった物理量をセンサ出力から推定することを可能にしつつある。ここではコンピュータビジョンの観点から光と色の計測と表現法を述べる。

Measurement and Representation of Light and Color - From a Viewpoint of Computer Vision -

Shoji TOMINAGA[†]

Recent advancement and spread of digital imaging technology cannot only make the traditional image capturing easier, but also makes it possible to estimate physical quantities such as the spectral distribution of light source and the spectral reflectance of object surface from the sensor outputs, which cannot be performed by the traditional measuring instrument. In this paper a method for measurement and representation of light and color is described from a viewpoint of computer vision.

1. はじめに

人間が自然界において見ることができる光の波長は 400nm から 700nm までのわずかに 300nm 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。実際は、眼に入射する物理情報は決して豊かではないが、人間はシーンをかなり詳細に認識することができる。コンピュータビジョンはカメラをベースとする機器で視覚系を構築し、その出力

から種々のアルゴリズムを開発してシーンを認識しようとする。

色彩情報として、物体表面の色は物体を認識する際に決定的な役割を演じている。しかしながら、物体色は物体に付随する属性ではないことに注意すべきである。物体色は、光源から放射された光が物体表面に反射し、それが色刺激として視覚系に入射することによって起こる。すなわち、物体色の知覚は光源の色や物体表面における光反射の仕方に大きく依存する。人間の視覚系は3種類のセンサをもつことから、物体色は物体に固有のものではなく、大腦において知覚されるものである。

このようなことからコンピュータビジョンにおける色彩の問題は、イメージング系のセンサ出力から光源の分光分布や物体表面の分光反射率といった物理量を推定する問題を含む。色知覚は心理物理量に基づくとともに心理知覚現象にも影響を受ける。そのため、人間の視覚系の特性を十分理解する必要がある。一方、近年イメージングデバイスにおける技術革新は目覚ましく、より高機能のイメージングシステムの開発が可能となってきた。また画像出力のデバイスとしてのディスプレイはそれ特有の入出力特性をもっており、人間の見る色を必ずしも表示していないことに注意すべきである。

本稿では主に次の項目について述べる。(1)光源の特性、(2)物体表面の特性、(3)視覚系の特性、(4)表色のためのカラーオーダーシステム、(5)色名による表色、(6)色の数量化と測色原理、(7)均等色空間と色差、(8)分光情報の獲得、(9)カラー画像の表示、などである。

2. 光源の特性

図1は光の性質を研究した Isaac Newton のスケッチである[1]。この実験で、Newton は実験室の窓に小さな穴をあけて、外光を実験系に導いている。テーブルの上にはレンズとプリズムがあり、外からの昼光はプリズムを通り、後ろの壁の上に虹の像を作っている。Newton はその虹の成分が光の基本構成であることを示した。スケッチの左端に更に壁があり、プリズムの光が穴を通して、二つ目のプリズムで更に分光されるようになっている。図面ではこの光線は二つ目の壁に投影されるが、もはや虹を生成していない。すなわち、Newton は最初の壁の上にある虹の像が、もとの昼光の基本構成であることを示した。彼はさらに別の実験でこの光の分解はリバーシブルである、すなわち、分解して得られた成分光を結合することによって、もとの昼光(白色光)が得られることを示した。

照明光源の代表は、従来、自然光の昼光と人工光源の電球であった。最近ではこれ以外に蛍光灯やLEDなど、エネルギー効率の良い人工光源が利用されている。図2(a)は昼光のD65光源と白熱電球の分光エネルギー分布である。図2(b)は蛍光灯の分光エネルギー分布の例である。ピークは発光による輝線スペクトルを表す。

[†]千葉大学大学院 融合科学研究科
Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

一般に不燃性物体を加熱すると次第に赤くなり、さらに高温に加熱すると物体の色は赤から黄、さらに白色へと変化する。このような熱放射による光の分光エネルギー分布(スペクトル)は黒体放射(Black Body Radiation)によって記述できることが知られている[2]。Planck は黒体放射を理論的に解析し、絶対温度 T をパラメータとして、分光分布(分光放射発散度)は次式で記述できることを示した。

$$M(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} (\exp(c_2 / \lambda T) - 1)^{-1} \quad (1)$$

ただし、 λ は光の波長で、 c_1 と c_2 は下記の定数である。

$$c_1 = 3.7415 \times 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^2] \quad c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}]$$

図 3 は異なった色温度をもつ昼光の分光分布をあらわす。これらの分光分布は 560nm で正規化して示されている。ここで分光分布と絶対色温度は 1 : 1 に対応することに注意する。一般に色の表示方法には、後述の三刺激値や色度座標が用いられる。しかし連続分布をもつ多くの光源は黒体放射で近似できるので、光源の色は絶対温度 T をパラメータとして表現することができる。図 4 は、CIE の uv 色度図上で、黒体放射の色度軌跡を描いたものである。すなわち、光源の色は色温度をパラメータとしてこの軌跡上を移動する。自然界および日常生活で頻繁に見かける多くの光源は、おおよそこの黒体軌跡上に存在する。

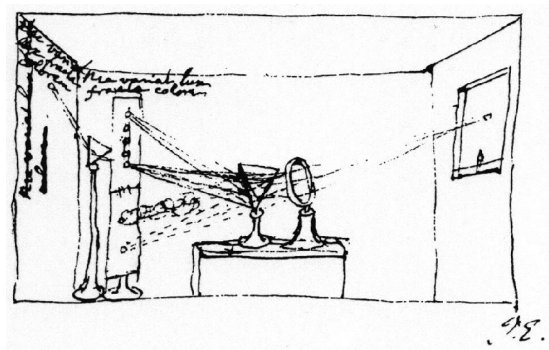
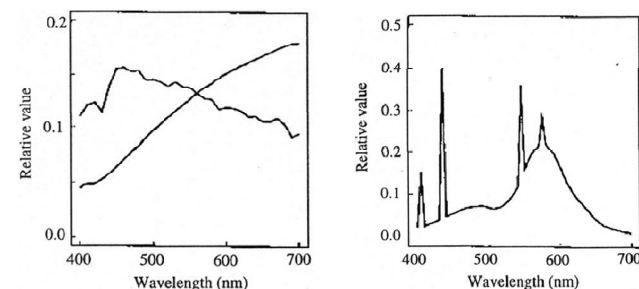


図 1 Newton の実験スケッチ図



(a) 昼光 D65 と白熱電球 (b) 蛍光ランプ
図 2 代表的な光源の分光エネルギー分布

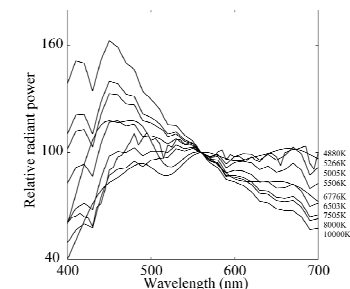
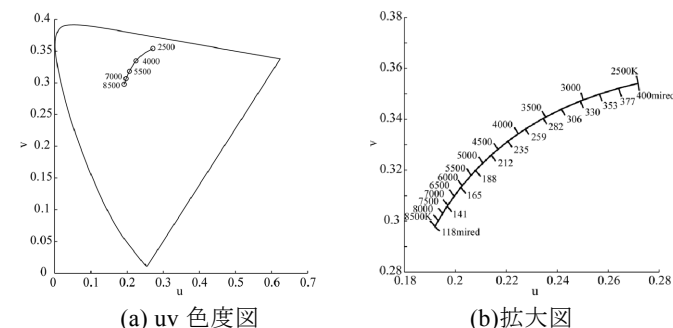


図 3 異なった色温度をもつ昼光の分光分布



(a) uv 色度図 (b) 拡大図
図 4 CIE-uv 色度図上での黒体放射の軌跡

3. 物体表面の特性

人間が物体を認識するのは、光源からの光が物体表面で反射し、その光が眼に入射からである。このためコンピュータビジョンにおいて、物体表面での反射特性を知することは非常に重要である。分光反射率は物体への入射光と反射光の比率をあらわすが、一般にその反射率は光の入射角度と受光角度に依存する。物体表面の分光反射率を求める第一ステップは物体からの反射光のスペクトル分布の測定である。これには一般に単色光をとりだすための分光器を使用する。分光反射率の測定は、通常、分光反射率が既知の白色板との置換による相対測定に基づく。すなわち、標準白色と対象物体を置換して、分光放射輝度を計測する。このとき、対象物体の分光反射率(分光放射輝度率)は分光放射輝度の比率より求まる。CIE(国際照明委員会)は、反射物体の測定における照明と受光の条件を定めて推奨している。例えば、物体面に対して入射角 45 度方向から照明し、垂直の法線方向へ反射する光を受光する。また、逆に法線方向から照明し、45 度方向に反射する光を受光する。さらに、拡散物体に対して積分球を用いて作った拡散光を試料に照明する方式や、法線方向から照明して反射光を積分球により集める方式が推奨されている[2][3]。

3.1 2 色性反射モデル

物体表面の見えるは光源と物体の位置関係に依存して変化する。具体的には、表面が明るく見えたり、暗く見えたりするし、光沢感をもったり、強いハイライトが現れたりする。これは視覚系に入射する反射光の分光組成が、観測の幾何学的条件に依存することを意味する。また光沢やハイライトは表面がなめらかなプラスチックなどの物体表面に現れやすい。つまり光の反射の仕方は表面を形成する材質と観測条件に依存する。

このような物体表面の多様な反射の仕方を数学的に記述したものが反射モデルである。反射モデルは視覚情報処理に関する多くの分野で使用されている。実際、コンピュータグラフィックスでリアルな画像を生成するために反射モデルは必要である[4]-[9]。またコンピュータビジョンや画像処理の分野でも近年多用されている。実用されているモデルで最も基本的なものは 2 色性反射モデル(dichromatic reflectance model)と呼ばれる[10]-[13]。

図 5 は不均質誘電体に対する 2 色性反射のモデルを示している。自然界に存在する多くの物体表面近くの層は、このような不均質誘電体の構造で近似できる。これは媒体と埋め込まれた色素のように異なった成分材料から構成される。この場合、物体表面から反射する光は物理的に異なった 2 つの経路で反射する。

まず一部の光は物体表面と空気層の境界で反射する。このタイプの反射は鏡面からの反射のようになり、反射光は狭い角度でのみ観測される。また図 5 のように、反射方向のベクトルと法線のなす角は入射角に等しくなる。この反射は鏡面反射(あるいは

正反射、界面反射)と呼ばれる。次に、物体表面を通過して着色層に入射した光は色素粒子との間で光の散乱を起こす。この光は境界面を通過して空気中に戻ったときに観察されるが、散乱によるので反射光に方向性はない。この第 2 の反射は拡散反射(あるいは内部反射)と呼ばれる。

物体表面からの反射光はこれら 2 つの加法的成分からなる。つまり反射光の放射輝度 Y は波長と角度をパラメータとして

$$Y(\theta, \lambda) = Y_s(\theta, \lambda) + Y_d(\theta, \lambda) \quad (2)$$

と書ける。ここで θ は入射角、位相角、観測角などの反射を記述するのに必要なすべての幾何学的なパラメータを含む。添字の S と D は、それぞれ、鏡面と拡散成分を表す。

2 色性反射モデルの重要な仮定の一つは λ と θ が分離可能なことである。すなわち反射光成分は次のように波長と幾何学的因子に分割できる。

$$Y(\theta, \lambda) = c_s(\theta) L_s(\lambda) + c_d(\theta) L_d(\lambda) \quad (3)$$

ここで、 $L_s(\lambda)$ と $L_d(\lambda)$ はそれぞれの成分の分光放射輝度で、これらは角度が変化しても一定である。 $c_s(\lambda)$ と $c_d(\lambda)$ は角度パラメータによるスケールファクタである。また反射モデルは分光反射率を用いて記述することができる。 $S_s(\lambda)$ と $S_d(\lambda)$ を、それぞれ、鏡面反射成分と拡散反射成分の分光反射率とすると、放射輝度 Y は次式のように記述できる。

$$Y(\theta, \lambda) = c_s(\theta) S_s(\lambda) E(\lambda) + c_d(\theta) S_d(\lambda) E(\lambda) \quad (4)$$

2 色性反射モデルの第 2 の仮定は、分光反射率の鏡面成分 $S_s(\lambda)$ が可視域で一定値をとることである。つまり鏡面反射光は照明光と同じ分光組成を持つと仮定している。したがって反射光は次式のように表現できる。

$$Y(\theta, \lambda) = c_s(\theta) E(\lambda) + c_d(\theta) S_d(\lambda) E(\lambda) \quad (5)$$

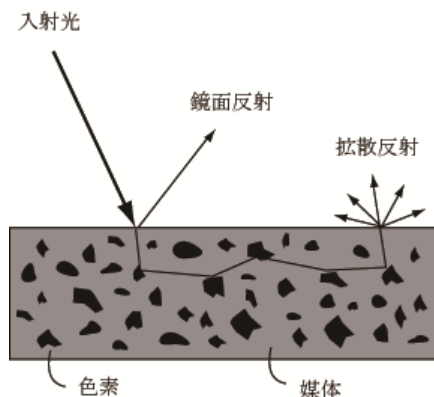


図5 不均質誘電体の2色性反射のモデル

3.2 線形モデル

照明光の分光分布や物体表面の反射率は波長の関数である。このような関数を計測データに基づき可視領域で数学的に効率よく記述することは、分光データの簡略化とともに、照明光や反射率を推定する問題を解くために重要である。これまで、照明光の分光分布や物体表面の分光反射率の多くは複雑な波長の関数ではなく、有限個の基底関数を用いて展開できることが知られている。すなわち、光源の分光分布は幾つかの基底関数の線形結合として表現し、また、物体表面の反射率は別の基底関数の線形結合として表現できる。このような表現形態を、有限次元線形モデル(Finite dimensional linear model)と呼ぶ[1][14]。

まず、照明光の分光分布 $E(\lambda)$ は m 個の基底関数の線形結合

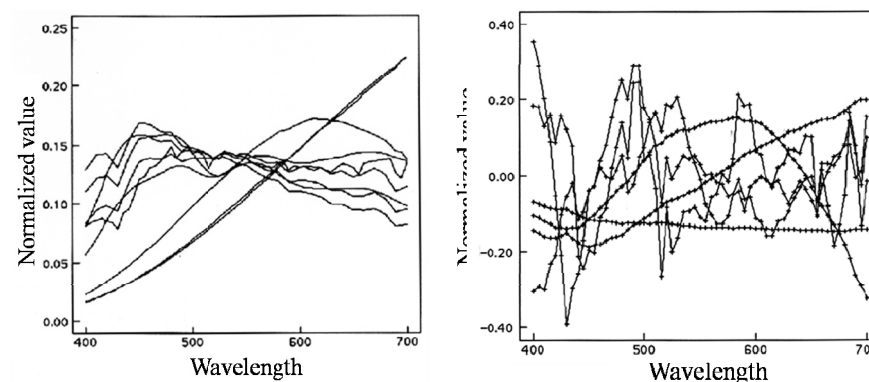
$$E(\lambda) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i E_i(\lambda) \quad (6)$$

のように表現する。ここで $\{E_i(\lambda), i=1, 2, \dots, m\}$ は照明光に対して統計的に決定される基底関数の集合で、 $\{\varepsilon_i\}$ はそれらに対する重み係数の集合である。基底関数の数 m はモデルの複雑さ、数学的には次元を意味する。また、物体の分光反射率関数 $S(\lambda)$ は n 個の反射率基底関数を用いて同様な形式で表現する。

$$S(\lambda) = \sum_{j=1}^n \sigma_j S_j(\lambda) \quad (7)$$

ここで $\{S_j(\lambda), j=1, 2, \dots, n\}$ は反射率に対する基底関数の集合で、 $\{\sigma_i\}$ はそれらの重みの集合である。

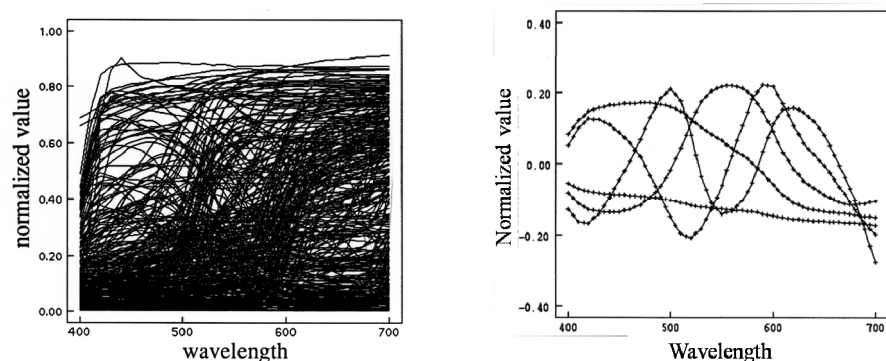
分光データのこのようなモデル化はかなり以前から検討されており、Judd ら[15]は典型的な昼光の分光分布が少数の基底で記述できることを示した。図 6(a)は筆者らが集めた代表的な光源の分光分布で、CIE の標準の光 A, B, C や D55, D65, D75, さらにハロゲンランプ、スライドプロジェクタランプの分光分布が含まれている。図 6(b)は図 6(a)から主成分分析によって得られた基底関数である。この中で第一主成分から第三主成分に対応する基底関数(図中の滑らかな曲線)でほぼ全ての分光分布が表現できることがわかった。図 7(a)は筆者らが集めた物体表面の分光反射率データベースである。これにはマンセル色票や Dupont のデータ、その他日常生活で見かけられる多くの分光反射率データを含む。図 7(b)は主成分分析によって得られた 5 つの基底関数である。これらの基底関数によって、全ての分光反射率を近似できることがわかった。その他、Cohen[16], Maloney[17], Parkkinen ら[18], Vrhel ら[19]は種々の天然物体、人工物体を計測し、同様な解析を行った。すべてを総合すれば、7 個以内の基底関数で分光分布を十分推定できるといえる。



(a) 代表的な光源の分光分布

(b) 主成分分析結果

図6 光源分光分布の線形モデル



(a)分光反射率データベース (b) 主成分分析結果
図7 分光反射率の線形モデル

4. 人間の視覚系の特性

物体からの反射光は色刺激として人間の眼に入射する。視覚系ではイメージセンサとしての錐体の吸収が網膜上でおこる。錐体は3種類の異なった分光感度特性をもち、入射した色信号を3つの色成分に分解する。図8は人間の網膜上に存在するL錐体、M錐体、S錐体の分光感度をあらわす。L、M、Sの各錐体は、それぞれ、可視光の長波長、中波長、短波長の光に対して応答する。一方コンピュータビジョン系では、カメラは3チャンネルRGBのカラーカメラが一般的であるが、最近では分光情報を獲得するために、マルチチャンネルカメラやスペクトルカメラが用いられることも多くなってきた。

人間の明るさに対する感覚を感度というが、明るさに対する分光感度は波長に依存する。図9はCIEが定めた人間の明るさに対する分光感度で、標準比視感度曲線と呼ばれる。 $V(\lambda)$ は錐体による明所視での分光感度を示し、555nmで最大値をとる。一方、 $V'(\lambda)$ は杆体による暗所視での分光感度をあらわす。比視感度曲線 $V(\lambda)$ は明るさの感度をあらわすので、コンピュータビジョンにおける視覚系の構築において感度を決定する上で重要である。

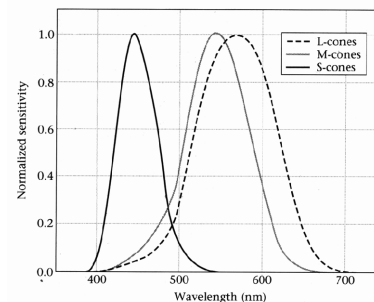


図8 網膜上の錐体の分光感度

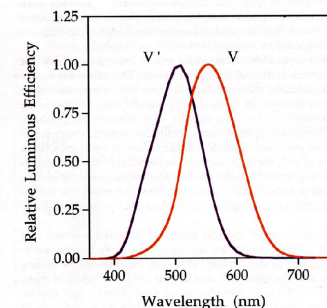


図9 CIEの標準被視感度曲線

4.1 輝度レンジ

図10は、実シーンにおける輝度のレンジと、ディスプレイ装置で表示できる輝度のレンジとを比較している。我々が生活する現実世界には、夜空の星の明るさ（約 10^{-4}cd/m^2 ）から太陽の光（約 10^6cd/m^2 ）まで、 $10^{10}:1$ にもおよぶ輝度レンジが存在する。これに対して、ディスプレイ装置は、 $10^2\sim10^3$ 程度の狭いレンジしかもたない。人間の視覚系は、同時に約 $10^4:1$ の明暗比を見分けることができるといわれ、順応機能によってさらに広い輝度レンジに対応することができる。しかしながら、我々が眺める実シーンをそのままディスプレイに再現することはできない。

人間の眼に入射する光の強さと明るさの感覚は、広いレンジでみれば、線形な関係でないことが知られている。例えば、輝度弁別の実験では、輝度差がどれだけあれば、二つのものが異なって見えるかを問うのである。このとき、弁別の輝度差は環境光の輝度に比例し、この関係はWeberの法則としてよく知られている。また、この関係は、人間の明るさ感覚と入射光の輝度との関係（Fechnerの法則）を示唆する。すなわち、明るさ感覚 R は次式のように輝度の対数に比例する。

$$R = k \log \frac{L}{L_0} \quad (8)$$

ここで L は入射光の強度（輝度）、 L_0 は明るさ感がなくなるときの輝度、 k は定数である。また、Stevensら[20]は、光強度に対する明るさ感覚は光強度の対数関数ではなくて、次のような指数関数で表わされるとしている。

$$R = k(L - L_0)^n \quad (9)$$

ここで指数 n は定数で、 $n=1/3$ を使用することが多い。

このような心理物理学のアプローチとは別に、生理学的アプローチがあり、動物の網膜の光に対する応答を調べている。いま、入射光の強度（輝度）を L 、それに対する応答の大きさ（電圧）を R とすれば、

$$R = R_{\max} \frac{L^n}{L^n + L_{1/2}^n} \quad (10)$$

の関係式が導かれている。例えば、Naka ら[21]は魚の鯉を用いて、網膜中の水平細胞の発生する電位（S-ポテンシャル）を調べた。ここで R_{\max} は R の最大応答、 $L_{1/2}$ は R が $R_{\max}/2$ となるときの光強度である。 n は定数であるが、この値は R を L の関数 $R=f(L)$ とするとき、その曲線の傾きを表わすパラメータとなる。

以上の三つの関係式は、人間の光に対する明るさ感覚を予測させ、一見異なってみえるが、曲線を描けば類似していることがわかる。すなわち、 L が小さい領域では急速に上昇し、 L が大きくなれば、やがて飽和する特性である。

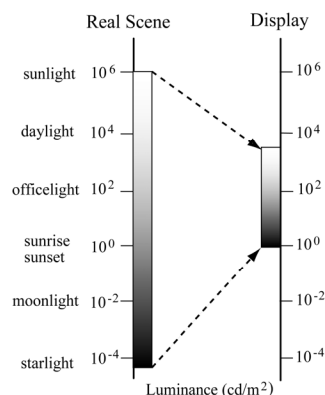


図 10 実シーンとディスプレイの輝度レンジの比較

4.2 色恒常性

人間の視覚系には、照明の変化に対して物体の色の見えが大きく変化しないという能力がある。この現象を色恒常性、あるいはカラーコンスタンシー(Color Constancy)と呼ぶ。例えば、読書の際の紙は、日光の青空のもとでも、夕焼けの赤い色光のもとでも、白く見える。しかし、視覚系に到達する色信号のスペクトル組成は大きく変化している。このような色恒常性をコンピュータビジョンとして実現する問題は、しばしば、シーンにおける物体表面の分光反射率をカメラデータから推定する問題として取り扱われる。これは分光反射率が物体表面に固有の物理情報で、分光反射率がわか

れば、正確な物体色を作りだすことが出来るからである。

4.3 色順応

人間の視覚系には明るさに順応する明順応や暗順応特性が知られている。例えば、暗順応は明るい屋外から映画館に入場したとき、最初は暗くて環境を認知することが出来ないけれども、時間が経つにつれ周辺の状態を見ることが出来る現象である。色に対する順応効果を特に色順応と呼ぶ。同じ色を見つめていると、次第に彩度が減少していき、他の色を提示すると異なって見える。色の順応のメカニズムに対して、von Kries[22]はモデルを提案し、今日に至るまで説得力のあるモデルとしてよく利用されている。この順応モデルでは、眼の分光感度関数是不変で互いに独立である。ただ、異なった照明光に対する視覚系の順応は各色チャンネルに付随する3つのゲイン係数を調整することにより達成されると考えられている。

図 11 は von Kries による色順応のメカニズムを明示している。視覚系の錐体の感度は日光のもとでバランスがとれているとする。白熱電球の分光エネルギー分布は短波長領域で低く、長波長領域で高い。したがって、この光源は黄色っぽく見える。しかしながら、色順応が進むにつれて、短波長域で錐体の感度が増大し、長波長域での錐体の感度は減少する。ただし、中波長域での錐体の感度は変わらない。それゆえ、照明光の分光分布が変化しても、物体色の見えは日光下での見えを保持することになる。

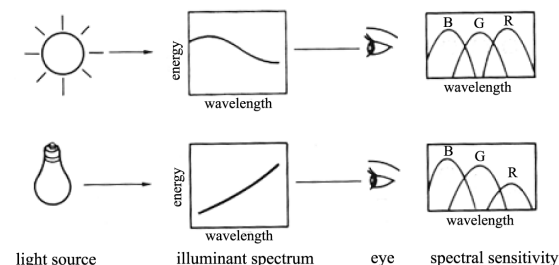


図 11 色順応のメカニズム

4.4 その他の心理的效果

その他の心理的效果として、色対比はシーンに存在する物体色の判定に影響を及ぼす。色対比効果とは、単独で色を見たときと異なった見え方をする現象で、例えば、周囲を囲まれた無彩色の領域は、周囲の補色の色相に近づいて見える。このように異なった二つの色を並べて見たときの効果を同時対比効果と呼び、見ている色を消して別の色が提示されたときの効果を継時対比効果と呼ぶ。

5. 表色のためのカラーオーダーシステム

人間の視覚系には3種類の錐体が存在し、色信号は3次元信号として捉えることができる。このため、色を表現するために3つの尺度を用いる3次元空間が必要になる。これが表色系である。色の表示システムとして、知覚色に基づく顕色系と心理物理色に基づく混色系が存在する。前者のシステムはカラーオーダーシステムと呼ばれ、物体色の色見本として、よく使われる色票を心理的な尺度で並べることで、色を配置することに有用である。色知覚の3つのスケールとして、色相(Hue)、明度(ValueあるいはLightness)、彩度(ChromaあるいはSaturation)の3属性を用いることが多い。

5.1 マンセル表色系

マンセル表色で用いる3属性はヒュー(Hue)、バリュー(Value)、クロマ(Chroma)と呼ぶ。しかし、一般には簡単に色相、明度、彩度と呼ばれる。図12にこの表色系の空間構造を示す。各属性は次のように定義される。

- (1)色相 H: 光スペクトルの異なった組み合わせをあらわす属性である。赤(R)、黄色(Y)、緑(G)、青(B)、紫(P)と中間色 YR, GY, BG, PB, RP の各基本色相をさらに、10分割し全体に100色相が等ステップで図12のように円形に配列される。
- (2)明度 V: 明るさ(暗さ)を特徴付ける。理想的な白を最高明度で $V=10$ 、理想的な黒を最低明度で $V=0$ 、その間の灰色を視覚的に等ステップで分割している。
- (3)彩度 C: 色味の強さを尺度化する属性である。同じ明るさの赤であっても、赤みの強い場合と弱くて灰色に近い場合がある。無彩色は $C=0$ である。

このように任意の物体色は、無彩色を中心軸とする H, V, C の円筒座標系で表色される。

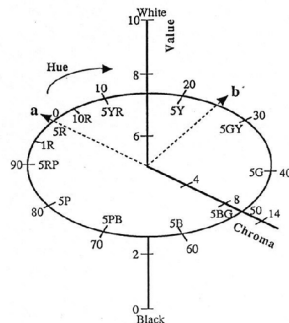


図12 マンセル色空間

5.2 NCS 表色系

NCS(Natural Color System)は新しいタイプのカラーオーダーシステムで、その表色原理はヘリング(Hering)の反対色説に基づいている。NCSでは原色としてW(白), S(黒), Y(黄), R(赤), B(青), G(緑)の6色を使用する。NCSの尺度構成はこれらの基本色を用いたマグニチュード推定法に基づいている。すなわち、対象とする色に含まれている基本色は、どの程度であるか数字で表示するものである。このとき、どのような色知覚であっても全体を100%と考え、そのうちの基本色の割合をその色の表記とする。このとき、基本色の割合を基本属性と呼び、w, s, y, r, b, g で表す。色知覚全体を100とするので、

$$w + s + y + r + b + g = 100 \quad (11)$$

が成立する。

反対色に基づくため、黄と青あるいは赤と緑は同時に知覚されない。従って、6色の基本属性の中で最大4色の基本属性を表記することになる。

色相は有彩色の y, r, g, b に分けることができる。色味 c (Chromaticness)は次式で表す。

$$c = y + r + b + g \quad (12)$$

全ての色知覚は6つの色属性によって構成されるので、

$$w + s + c = 100 \quad (13)$$

が成立する。無彩色は $c=0$ である。これよりNCSではW, S, Cを頂点とする正三角形内の点として表示される。

NCSの色空間はこのような色三角形を図13のようにW-S軸を中心に回転した円錐駒上のようなになる。回転の中心は無彩色である。

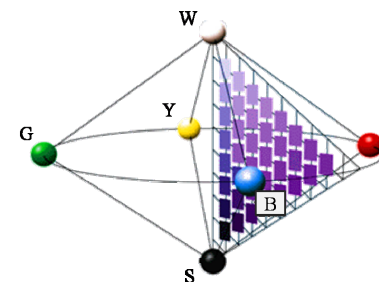


図13 NCSの色空間

6. 色名による表色

色名による表色は、視覚系に入射した色刺激が脳に伝わって生成される言葉を用いることから、色知覚の高次表現といえる。実際、実世界に存在する無数の色刺激を、我々は色名という色彩語彙でラベル付けして表現している。最近の情報画像研究の分野では、三刺激値や RGB 値などの数値に基づいて色を伝達・理解するよりも、言葉に表色が直感的にわかりやすいため、色名を利用した解析や表示に注目が集まっている。例として、色名を利用した画像の領域分割[23]や色域写像[24]が有効であるという報告がある。

色彩語彙に関する代表的な研究の一つは Berlin と Kay[25]によって提唱された、基本色彩語彙による。この理論は、言語心理学と民俗学の調査研究に基づいており、世界で用いられている多くの言語は色の基本的な分類の仕方に共通のシステムをもっているというものである。すなわち、環境の異なる国々においても、用いられている基本的な色彩語彙は類似しており、人類の諸言語に共通する 11 種類の基本色彩語が存在するという。これらは White, Black, Red, Green, Blue, Yellow, Brown, Purple, Pink, Orange, Gray である。近年、各国において色彩語彙の調査がなされている。従来、色見本を用いた調査が主流であったが、最近では、インターネットの WEB を利用して色名を収集する研究[26]や Google や eBay などのサイトから自動的に画像を収集し、色名と対応付ける研究[27]がある。

富永ら[28][29]は現代の日本人の色彩語彙について詳細な調査を行った。調査はアンケート方式で想起色名を調査する。この特徴はメタリックカラーなど、色見本で表現することが困難な色名の存在と重要性を知ることができる。この調査では二段階の重要度で色名をレベル分けしている。

レベル 1: 日常生活で普段から使用する、あるいは日常生活をおくる上で基本的に必要な色名。

レベル 2: レベル 1 の中で日常生活をおくる上で絶対に必要な色名。

図 14(a)は約 2000 人の被験者について集計したレベル 1 の色名ヒストグラムである。この結果において、Berlin と Kay の基本色彩語彙(赤、白、黒、青、緑、黄、茶、ピンク、オレンジ、紫、灰)の 11 色名が全体の上位 11 位までを占めている。現代日本語においても一致した結果が得られた。図 14(b)はレベル 2 に対する色名ヒストグラムである。上位 6 位に反対色の対(赤-緑、青-黄、白-黒)が占めていることに注目される。さらに反対色応答の 6 色と 7 位の色名では大差があり、上位 6 色が特に必要とされる語彙であることがわかる。さらにレベル 1 およびレベル 2 の色彩語彙において、金や銀といったメタリックカラーの使用頻度が多く、水や黄緑といった色名が続くといった共通した特徴がみられる。

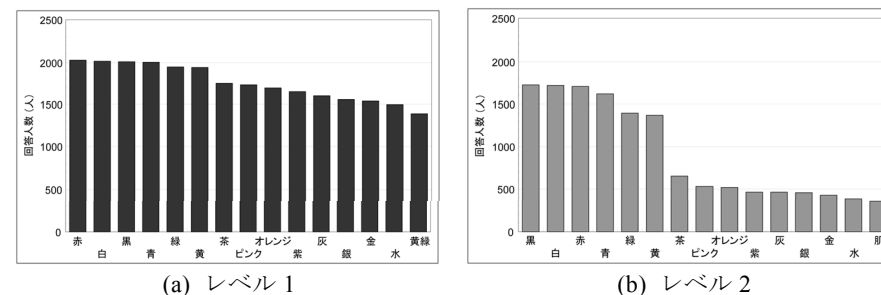


図 14 色名ヒストグラム

7. 色の数量化と測色原理

7.1 イメージセンサの条件

通常物体色を測色する機器を測色計と呼ぶ。これに対してイメージング系は画像獲得が主目的で測色についてあまり配慮されていない。ここでは、測色をも可能とするイメージング系を設計するためにイメージセンサが満足すべき条件を示す。いま人間の視覚系の応答関数を $e_1(\lambda)$, $e_2(\lambda)$, $e_3(\lambda)$ とする。色光の分光分布を $Y(\lambda)$ とすれば、色刺激は次のような 3 つ積分値としてあらわされる。

$$E_i = \int_{400}^{700} Y(\lambda) e_i(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

他方、イメージング系は m 個のイメージセンサを使用するものとする。これらの分光感度曲線を $r_1(\lambda)$, $r_2(\lambda)$, \dots , $r_m(\lambda)$ で記す。このとき、イメージセンサの出力は次式で表せられる。

$$R_i = \int_{400}^{700} Y(\lambda) r_i(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

可視光域[400, 700nm]を等間隔でサンプルし、 m 個の波長点で分光関数を表現するものとする。このとき 2 種類の観測方程式は n 次元ベクトルの内積に置き換えて、表現することができる。

$$E_i = \mathbf{Y}^T \mathbf{e}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (16)$$

$$R_i = \mathbf{Y}^T \mathbf{r}_i, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (17)$$

ここで、本来ベクトル \mathbf{Y} とベクトル \mathbf{e}_i のベクトルの要素は非負であるが、数学的解析の便宜上、ここではそのような物理的な制約をつけない。

等色(カラーマッチング)の性質は人間の色知覚の最も重要な要素で、心理物理的な現象としての色の測定および再現の根拠をなすものである。眼に入射する色光の物理的性質は $Y(\lambda)$ で定まるが、視覚系は色を知覚してもそのスペクトルの組成を知ることはい出来ない。実際、同一の色知覚を与えるスペクトル分布はいくらでも存在する。この現象はメタメリズムあるいは条件等色と呼ばれる。また、メタメリックな色とは同じ色刺激 E_1, E_2, E_3 を有するが、分光組成の異なる色を示す。図 15 はメタメリズムとなる分光分布の対を例示している。メタメリズムは数学的に理解することができる。いま色刺激値の空間を E_1, E_2, E_3 の縦ベクトルで表せば、写像は多対 1 の関係

$$Y(\lambda) \rightarrow \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

となり、このとき、色光の分光分布が $Y_1(\lambda) \neq Y_2(\lambda)$ と異なるにも関わらず、等色

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}_2 \quad (19)$$

と判断されることである。

さて、人間の視覚系で異なって見える色光はイメージセンサで必ず異なった出力値として区別できなければならない。すなわち、イメージセンサの色の分解能は視覚系と同程度かあるいはそれ以上でなければならない。この条件から次の定理を導きだすことができる(詳細は文献[30]参照)。

[定理 1] 視覚系の分光感度曲線は、イメージセンサの分光感度曲線の線形変換として表現できなければならない。

視覚系で三色応答を司る組織は網膜上の錐体であると考えて、その応答関数を求める種々の方法が考案されてきた。しかし、標準的な分光応答関数 $e_1(\lambda), e_2(\lambda), e_3(\lambda)$ の信頼できる姿はまだ確定していない。現実の測色には CIE の等色関数が使用される。等色関数は網膜の生理的な応答特性を直接あわすものではないが、正常な観測者の視覚系の色応答特性を代表するものである。この関数は三原色 RGB を用いた心理物理的な等色実験を行って得られたものである。したがって、視覚系の等色性に関して

分光感度関数と同等の機能をもつ。CIE の等色関数の決定には長い歴史があるが、現代では図 16 の等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ がもっぱら実用されている。このとき、色刺激値は次式のように与えられる。

$$E_1 = \int_{400}^{700} Y(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, E_2 = \int_{400}^{700} Y(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, E_3 = \int_{400}^{700} Y(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (20)$$

CIE の等色関数を用いれば、実用的なセンサの条件が得られる。

[定理 2] センサの分光感度曲線の線形変換で CIE の等色関数が記述されなければならない。

$$\bar{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^m a_{1j} r_j, \quad \bar{\mathbf{y}} = \sum_{i=1}^m a_{2j} r_j, \quad \bar{\mathbf{z}} = \sum_{i=1}^m a_{3j} r_j \quad (21)$$

ただし、 $\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}$ は $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ のベクトル表現である。一般に使用される測色計やイメージング系は 3 つのセンサをもつ。このとき、上の条件はルータ条件と呼ばれる。

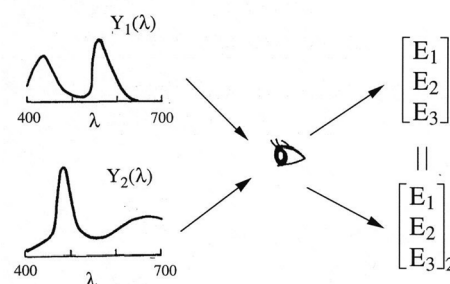


図 15 メタメリズムとなる分光分布の対の例

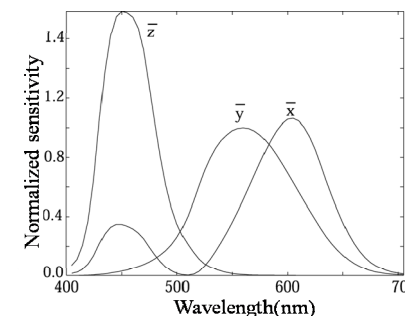


図 16 CIE の等色関数

7.2 CIE-XYZ 表色系

CIE の等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ で計算される色光の色刺激値は (20) 式を用いて計算される. この色刺激値を特に三刺激値 XYZ と呼ぶ. また反射物体の色刺激値についても次式のように三刺激値が定義される.

$$\begin{aligned} X &= K \int_{400}^{700} E(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, & Y &= K \int_{400}^{700} E(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= K \int_{400}^{700} E(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (22)$$

ここで, $E(\lambda)$ は光源の分光エネルギー分布, $S(\lambda)$ は物体の表面分光反射率, K は正規化定数で $S(\lambda)=1$ の完全白色物体に対して $Y=100$ となる.

なお図 16 の関数 $\bar{y}(\lambda)$ は比視感度曲線と定められており, 図 9 の標準比感度関数 $V(\lambda)$ に一致する. このため刺激値 Y は視感反射率と呼ばれたりする. すなわち, 物体色の明度情報を表現する. また, 色度情報は三刺激値を基準化した値

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (23)$$

で定義し, これらの 2 次元座標 (x, y) で表現される. これは図 17 のような色度図上で具体的に指定され, 全ての物体色は馬蹄形の閉領域内部にプロットされる. 周囲の曲線は可視光域の単色光による軌跡である. また, 無彩色はその閉領域のほぼ中央に位置する. 従って, この中心点からの距離とともに, 色の彩度が增大する.

このように, 物体の色は 3 つの組 (x, y, Y) で表示されることになるが, この表色系を CIE-XYZ 表色系と呼ぶ. XYZ 表色系は等色条件を満足する. もし, 2 色の座標値 (x_1, y_1, Y_1) , (x_2, y_2, Y_2) が一致すれば, それらは同じ照明下のもとで等色であること示している.

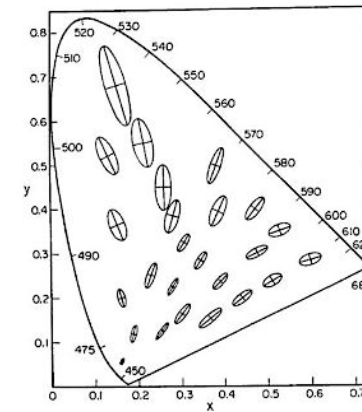


図 17. xy 色度図と MacAdam 楕円

8. 均等色空間と色差

XYZ 表色系は色相, 明度, 彩度といった心理知覚量を予測する目的には直接使用できない. これは空間が知覚的に等間隔になっていないからである. 図 17 に MacAdam 楕円を示す. 楕円のそれぞれは中心の色と区別出来なくて等色と判定された領域をあらわす(ただし, 10 倍に拡大している). 青色領域では, 色度図上のわずかな距離で楕円が検出されるが, 緑色領域ではその逆の傾向がある. 上述のようにマンセル表色系では, 色相, 明度, 彩度の各属性が知覚的に等ステップで分割された領域で空間が定義されている. このような等歩度性を有する空間を均等色空間(Uniform color space)と呼ぶが, 物理量との対応がつけにくい空間である. CIE では幾つかの均等色空間を提示している. $L^*a^*b^*$ 表色系は物体色に対して CIE が推奨した均等色空間の表色系である [2][31]. $L^*a^*b^*$ 空間は次の 3 つの量 L^* , a^* , b^* の直交座標系で定義される.

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \\ b^* &= 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \end{aligned} \quad (24)$$

ただし, X_0 , Y_0 , Z_0 は標準白色物体に対する三刺激値である. 上式は三刺激値の 3 乗根という非線形変換を示している. 図 18 はマンセル色空間と $L^*a^*b^*$ 空間を比較している. 2 次元 (a^*, b^*) の座標系の平面上に $V=5$ のマンセル座標をプロットしたもので,

一定色相の軌跡および一定彩度の軌跡が実線で描かれている． (a^*, b^*) の座標系が H と C からなる色度平面(H, C)をほぼ近似していることがわかる．

$L^*a^*b^*$ 表色系ではマンセル表色系の H と C に対応している色として，メトリック色相角 H_{ab^*} やメトリック彩度 C_{ab^*} などが a^* , b^* の関数として定義されている．

$$H_{ab^*} = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (25)$$

$$C_{ab^*} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (26)$$

さて，2色 (L_1^*, a_1^*, b_1^*) と (L_2^*, a_2^*, b_2^*) の色差はユークリッド距離として計算できる．

$$\Delta E_{ab^*}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (27)$$

ただし， $\Delta L^* = L_1^* - L_2^*$ ， $\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$ ， $\Delta b^* = b_1^* - b_2^*$ である．このように，イメージング系で獲得した物体色の色差は，まずセンサ空間から CIE-XYZ 色空間に変換し，さらに CIE- $L^*a^*b^*$ 色空間で表色することによって，ユークリッド距離として求まることになる．

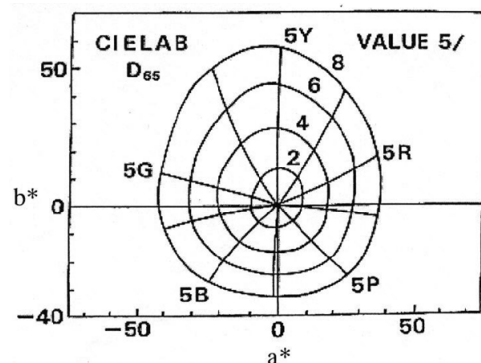


図 18 マンセル色空間と $L^*a^*b^*$ 空間の比較

9. 分光情報の獲得

9.1 分光イメージング

従来のカラーカメラによるビジョン研究には一定の限界があることが指摘されている．その理由の一つは，3 バンドカメラでは人間の等色性を現実に満足させることが出来ないからである．つまり，ルータ条件を厳密に満足させることができず，カラ

ーカメラは色彩計にはならないのである．二つ目の理由は，カラーカメラでは色恒常性の実現が困難なことである．色恒常性の一つの解釈は，物体の分光反射率と照明光の分光分布を分離する能力といえる[1][32]．このため，物体表面と照明成分を分離するためのアルゴリズムが数多く提案されてきた[13]．しかし，3次元のカメラシステムから複雑な連続関数を復元するためには本質的な難しさがある．三つ目の理由は，分光画像そのものを獲得・処理する必要性がでてきたことである．また画像の生成過程はそもそも分光で，分光エネルギー分布，分光反射率，分光透過率といった物理量の波長計算に基づく．つまり，各種視環境での物体の見えは分光計算で生成される．

さて，分光イメージング（マルチバンドイメージングも同様）は，RGBにとらわれずに，400–700nm に 4 つ以上のチャンネル数を有する撮像系である．このような分光イメージング系を使えば，上記の問題に対処することができる．まず，カメラ出力が多チャンネルになることにより，カメラ系の色分解を飛躍的に高めることができる．すなわち，人間にとって等色であっても分光レベルで区別することが可能である．次に分光情報の獲得がより直接的になることによって，分光関数の推定精度を高くすることができる．分光イメージングを実現するために様々な方法が考案されているが，現実に使用されるシステムとして以下の方法が挙げられる．

(1) 一般のカラーカメラにフィルタを外付けする方式

カラーカメラに一枚のカラーフィルタを追加すれば，もとの RGB 分光感度はシフトする．そこで，2 枚のフィルタを別々に装着して，2 回撮影すれば 6 チャンネルの画像が得られる．図 19 はカラーカメラに青紫と緑の 2 枚のカラーフィルタを追加して得られた総合分光感度である[33]．

(2) 干渉フィルタとモノクロカメラを組み合わせる方式

波長分解能を改善するために，干渉フィルタとモノクロフィルタを組み合わせている．図 20(a)は 8 チャンネルのカメラシステムの外観を示し，図 20(b)にその総合分光感度を示す．このシステムは分光関数の推定精度は良好であるが，レジストレーションエラーの補正が必要となる場合がある[34]．

(3) カラーフィルタとモノクロカメラを組み合わせる方式

複数のカラーフィルタの分光透過率を適切に選択することによって，可視光域を幾つかの帯域に分割することができる．図 21 に 6 種類のカラーフィルタとモノクロカメラからなる 6 色カメラの総合分光感度を示す．チャンネル数は，通常，照明光分光分布や表面分光反射率を決定するモデル次元から決定する．通常，分光関数は 3–5 次元の線形モデルで表現できることから，6 つの波長帯を使用している．このようなシステムは構造が単純で分光特性が安定しているという特徴がある．

(4) プリズム分光とモノクロカメラを組み合わせる方式

プリズムを使って分光した各波長の単色光を 1 次元のアレイセンサで受光すれ

ば、かなり光波長分解能の分光情報が得られる。イメージングには一定方向の走査が必要で、画像取得に時間がかかる。最近、プリズム分光のかわりに、干渉フィルタアレイを使用したシステムも提案されている。

(5)液晶の偏光特性を多段にうまく組み合わせれば、帯域フィルタとなる。その偏光特性を電子的に制御可能としたものは液晶チューナブルフィルタとして開発されている。このフィルタの構造は偏光干渉フィルタのリオフィルタの設計に基づいている[35]。図 22 にこのようなリオフィルタの透過特性を示す。図 22(a)は格段における分光透過率曲線で、図 22(b)は数段を結合したフィルタ全体の透過特性を示す。段数を増加すれば、より狭帯域のフィルタ特性となる。

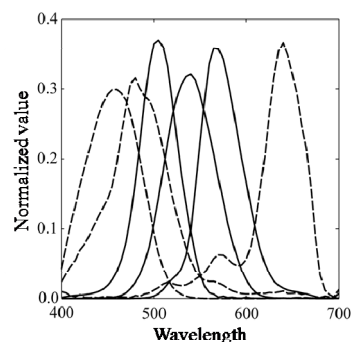
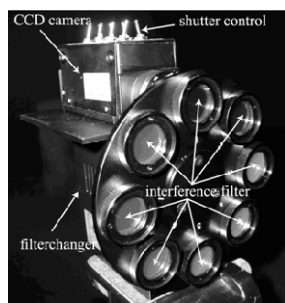
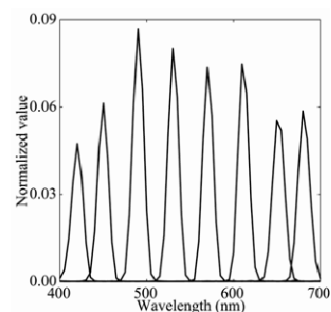


図 19 2 枚のフィルタを追加した総合分光感度



(a) システム概観



(b) 総合分光感度

図 20 干渉フィルタによる分光システム

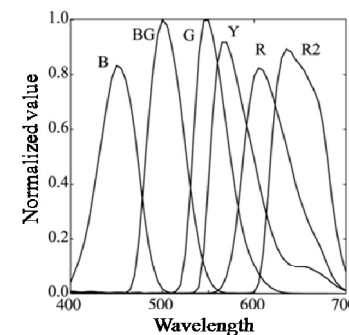


図 21 6 色カメラシステムの総合分光感度

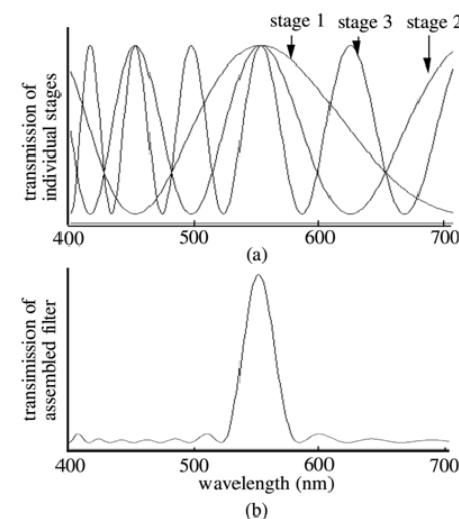


図 22 リオフィルタの透過特性
(a)各段の透過特性, (b) 結合透過特性)

9.2 分光関数の推定

(1)有限次元線形モデルの利用

照明光の分光分布と物体表面の分光反射率を記述するために、有限次元線形モデルを使用することができる。これは、連続関数を幾つかの基底関数の和で表すので、未

知数の数を大幅に減少させることができる。分光分布や分光反射率の基底関数をもとめるためにデータベースを利用する。図 6(b), 図 7(b)に分光分布, 分光反射率の基底関数を示した。このような基底関数を使って分光関数を推定する手法を示す。まず, 標準白色物体が使用できるならば, これに対するカメラ出力から分光分布を推定する。分光分布がわかれば, 他方の分光反射率は容易に推定できる。

しかし標準物体がなければ, シーンから両方推定することになる。自然界に存在する物体, あるいは人工物体の多くは不均質誘電体といえる。このような物体は標準の 2 色性反射モデルで記述することができる。すなわち, 物体表明には光沢があり, 照明により鏡面反射をおこし, ハイライトができたりする。この鏡面反射は照明光と同じ分光成分をもち, 従って, 画像から光沢あるいはハイライトを抽出すれば, そこから光源が推定できる。つまり, まず光源の光沢・ハイライトから光源を推定し, つぎに各物体の分光反射率を推定する 2 段階の過程となる(詳細は[36]参照)。

(2)Wiener 推定法の使用

カメラ系のノイズ成分を考慮すれば, Wiener 法が適している。このときセンサ出力は

$$\rho_i = \int_{400}^{700} Y(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda + n_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (28)$$

と書ける。ここで, n_i はセンサ i の出力に含まれるノイズ成分とする。この連続表現を離散的に表現するために, 分光関数を m 次元ベクトルで記述すれば, センサ出力は次のように行列で表現できる。

$$\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{y} + \mathbf{n} \quad (29)$$

ここで, \mathbf{y} は入射光の分光分布をあらわす n 次元ベクトル, ベクトル \mathbf{n} は m 次元ノイズベクトル, $\boldsymbol{\Lambda}$ は $m \times n$ 行列となり, 要素は $[R_i(\lambda_j)\Delta\lambda]$ となる。

\mathbf{y} に関する推定誤差を最小にする解は線形システム論でこれまで研究されており, 信号成分 \mathbf{y} とノイズ成分 \mathbf{n} が無相関の時, Wiener 推定が一つの最適解を与えることが知られている[37]。

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}_{yy} \boldsymbol{\Lambda}^T [\boldsymbol{\Lambda} \mathbf{C}_{yy} \boldsymbol{\Lambda}^T + \sigma^2 \mathbf{I}]^{-1} \boldsymbol{\rho} \quad (30)$$

ここで, \mathbf{C}_{yy} は入射光の分光分布(色信号)の相関を表す $n \times n$ 行列, σ^2 はノイズの分散を表す。

10. カラー画像の表示

10.1 三刺激値の算出

カラー画像の色を正確に再現したり, レンダリングするには, 画像の各ピクセル値を, 三刺激値 XYZ を用いて表現する必要がある。しかしながら, 一般のカラーカメラの分光感度曲線は前述のようにルータ条件を満足しない。また, 分光イメージングシステム(あるいはマルチバンドイメージングシステム)ではより詳細な分光情報が獲得できるものの, カメラ出力を三刺激値 XYZ に変換する必要がある。イメージセンサの出力を XYZ に変換するために, 通常, 最小二乗法にもとづく線形変換を利用する。いま等色関数をベクトル $\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}$ で表し, センサの分光感度を $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m$ と記す。このとき, 三刺激値とセンサ出力の関係を次式で表す。

$$[\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}] = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m] \mathbf{M} \quad (31)$$

ここで, \mathbf{M} は $m \times 3$ の変換行列である。これを最小二乗法で求めれば, 各画素における三刺激値はセンサ出力から次式で求まる。

$$[X, Y, Z] = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m] \mathbf{M} \quad (32)$$

10.2 ディスプレイ上での表示

ディスプレイ上で正確に色再現するためには三原色 RGB の加法混色を制御する必要がある。これにはカラーディスプレイの特性を考慮する必要がある。通常, カラーディスプレイの入出力関係は非線形であり, 三原色 RGB の色度も装置によって異なる。

現状で三原色が表示可能なディスプレイとして, RGB 各色に対して 8 ビットのリフレッシュメモリをもつディスプレイが一般的である。各画素に 24 ビット, すなわち約 1600 万色の表示機能がある。

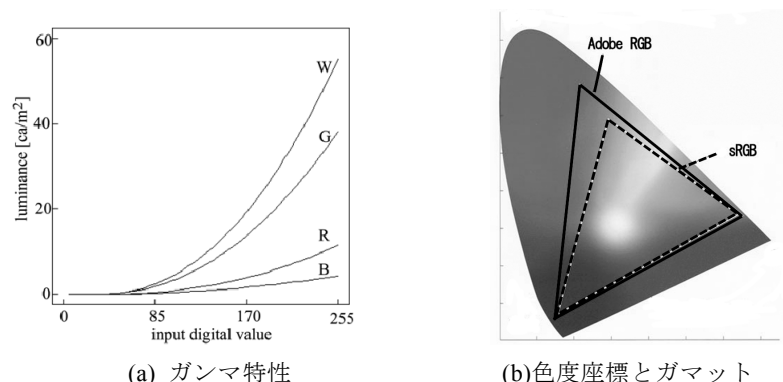
(1)ガンマ特性とガンマット

ディスプレイのデジタル入力と発光輝度の関係は線形ではない。この非線形特性はモニタのガンマ特性と呼ばれる。図 23(a)は実際のディスプレイについて RGB デジタル値と輝度値の関係を表す。次にディスプレイの三原色の色度座標の重要で, これによりモニタによる再現できる領域が定まる。最近のディスプレイ装置における三原色の色度点は標準化されている場合が多い。例えば, sRGB や Adobe RGB はディスプレイの色標準としてしばしば利用される。図 23(b)は CIE xy 色度図上で, ディスプレイの色座標を表示している。三つの色度点が形成する三角形の内部が色再現可能領域(ガンマット)である。ここで, 色再現域は人間の視覚系が見える色領域の内部に存在

することに注意する必要がある，すなわち，色再現が出来ない光源色や物体色はいくらでも存在するのである．

(2)色再現の手順

希望する色をディスプレイ上に測色的に再現することは XYZ 表色系からモニタの RGB 表色系に写像することになる．この手順は 1.色座標変換，2.ガンマ補正となる．具体的には，まず三刺激値を行列で座標変換し，つぎにテーブルで RGB に変換する．この時，色座標変換の行列はディスプレイの三原色の色度点と三原色の最大輝度値を用いて導出することができる．ガンマ補正のルックアップテーブルは図 26(a)の逆関数に基づいた補正テーブルとなる．



(a) ガンマ特性

(b)色度座標とガンマ

図 23 ディスプレイの特性

11. おわりに

本稿ではコンピュータビジョンの観点から光と色の計測と表現について述べた．ここではセンサ出力からシーンの物理情報の性質，色知覚を表現する方法，表色・測色の方法，分光情報の推定法，さらに色のレンダリング法などについて述べた．色の知覚は物体表面の質感や人間の心理特性が大きく影響している．今後，こういった質感表現や心理知覚現象をビジョン問題に組み込むことは重要な課題となる．また，カラー画像の最終評価者は人間である．カラー画像を評価するための規格や標準化についてはここでは述べなかった．現在，カラーマネージメントの研究も進んでおり，色再現やカラーレンダリングの評価法の研究も必要である．

参考文献

- 1) B.A. Wandell: Foundations of Vision, Sinauer Associates, Sunderland, MA (1995).
- 2) G. Wyszecki and W.S. Stiles: Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae, Wiley (1982).
- 3) CIE: Colorimetry, 2nd ed, CIE Publication No.15.2, CIE, Vienna, Austria (1986).
- 4) W. Matusik, H. Pfister, M. Brand and L. McMillan: A data-driven reflectance model, Proc. SIGGRAPH 03, pp.759-769 (2003).
- 5) T. Zickler, S. Enrique, R. Ramamoorthi and P. Belhumeur, Reflectance sharing: Image-based rendering from a sparse set of images, Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2005, pp.253-264 (2005).
- 6) A. Ngan, F. Durand and W. Matusik: Experimental analysis of BRDF models, Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2005, pp. 117-126 (2005).
- 7) R. Cook and K. Torrance: A reflection model for computer graphics, Proc. SIGGRAPH 81, Vol.15, No.3, pp.307-316 (1981).
- 8) B.T. Phong: Illumination for computer-generated pictures, Comm. ACM, Vol.18, No.6, pp.311-317 (1975).
- 9) E. Lafortune, S. Foo, K. Torrance, and D. Greenberg: Non-Linear Approximation of Reflectance Functions, Proc. SIGGRAPH 97, pp.117-126 (1997).
- 10) S. A. Shafer: Using color to separate reflection components, Color Research and Application, Vol.10, pp.210-218 (1985).
- 11) S. Tominaga and B. A. Wandell: The standard surface reflectance model and illuminant estimation, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.6, pp. 576-584 (1989).
- 12) S. Tominaga: Surface identification using the dichromatic reflection model, IEEE Trans. PAMI, Vol.13, pp.658-670 (1991).
- 13) 松山隆司, 他編: コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ (1998).
- 14) L. T. Maloney and B. A. Wandell: Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.3, pp.29-33 (1986).
- 15) D.B. Judd, D.L. MacAdam, and G.W. Wyszecki: Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature, J. Opt. Soc. Am., Vol.54, pp.1031-1040 (1964).
- 16) J. Cohen: Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips, Psychonomical Science, Vol.1. pp.369-370 (1964).
- 17) L.T. Maloney: Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.10, pp.1673-1683 (1986).
- 18) J.P.S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen: Characteristic spectra of Munsell colors, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.6, No.2, pp.318-322 (1989).

- 19) M.J. Vrhel, R. Gershon, and L.S. Iwan: Measurement and analysis of object reflectance spectral, Color Res. and Appl., Vol.19, pp.4-9 (1994).
- 20) J.C. Stevens and S.S. Stevens: Brightness function: Effects of adaptation, J. of Optical Society of America, Vol.53, pp.375-385 (1963).
- 21) K.I. Naka and W.A.H. Rushton: S-potential from colour units in the retina of fish (Cyprinidae), J. of Physiology, Vol.185, pp.536-555 (1966).
- 22) J. von Kries: Chromatic adaptation, Festschrift der Albrecht-Ludwig-Universitat, pp. 145-158, Firbourg (1902).
- 23) A. Mojsilovic: A method for color naming and description of color composition in images, Proc. Int. Conf. Image Processing, pp.789-792 (2002).
- 24) H. Motomura: Analysis of gamut mapping algorithms from the viewpoint of color name matching, J. SID, Vol.10 No.3, pp.247-254 (2002).
- 25) B. Berlin and P. Kay: Basic Color Terms Their Universality and Evolution, University of California Press (1969).
- 26) N. Moroney: Unconstrained web-based color naming experiment, SPIE Color Imaging Device-Dependent Color, Color Hardcopy and Graphic Arts VIII, pp.36-46 (2003).
- 27) J. van de Weijer, C. Schmid, J.J. Verbeek: Learning Color Names from Real-World Images, Proc. CVPR, pp.1-8 (2007).
- 28) 富永昌治: 現代色彩語彙の調査と分析, 日本色彩学会誌, Vol.15, No.2, pp.119-126 (1991).
- 29) 小野文路, 堀内隆彦, 富永昌治: 現代日本人を対象とした色彩語彙の調査と分析, 日本色彩学会誌, Vol.34, No.1, pp.2-13 (2010).
- 30) 富永昌治: カラー画像計測系を設計するための一般的条件とその適用, 電子通信学会論文誌(D), Vol. 69-D, No.11, pp.1645-1653 (1986).
- 31) 富永昌治: 測色論に基づいたコンピュータ・カラー・ビジョンのための写像法, 情報処理学会論文誌, Vol.26, No.2, pp.318-328 (1985).
- 32) 富永昌治: 色知覚と色彩メディア処理(V・完), 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.1, pp.62-69 (1999).
- 33) S. Tominaga, T. Fukuda, and A. Kimachi: A High-resolution Imaging System for Omnidirectional Illuminant Estimation, J. Imaging Science and Technology, Vol.52, No.4, pp.040907:1-9 (2008).
- 34) S. Nishi and S. Tominaga: Spectral Reflection Modeling for Image Rendering of Water Paint Surfaces, Proc. 4th European Conf. on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, pp.581-584 (2008).
- 35) S. Tominaga: Spectral imaging by a multi-band camera, J. of Electronic Imaging, Vol.8, pp.332-341 (1999).
- 36) S. Tominaga: Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.13, pp.2163-2173 (1996).
- 37) S. Kay: Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory, Prentice-Hall (1993).