

## ドラムスキャナの色信号特性と その表色系との対応について†

富 永 昌 治\*\*

近年ドラムスキャナはカラー画像入力装置として普及しつつある。その計測画像を色彩として解析する際に、重要となる問題の一つは色信号を人間の色知覚に対応づけることである。本論文では、カラードラムスキャナの色信号の特性を検討し、色信号をマンセル表色系へ写像する方法を提案する。計測対象は色紙、印刷物などのように反射測光される試料の表面色であり、これに対する色知覚をマンセルの色相、明度、彩度の3属性で表現することを試みる。まず、表色系の構造と、ドラムスキャナの測色系で B/W(白黒), R, G, B 信号の計測原理を明らかにする。そして標準マンセル色票を実測することによって、表色系と色信号特性との関係を検討する。この結果、(1) B/W 信号と明度、および(2) R, G, B 信号とクロマチックネスの間にそれぞれ基本的な対応関係が構成できることを示す。次に、任意の色見本のマンセル表色値を簡便に推定することを目的として、色信号をマンセル空間へ写像する実用的な方法を展開する。本論文では、写像を一つの行列演算で定義し、この変換行列を多数の色票の実測データに基づいて決定する方式を採用している。また能率的な計算法も提示する。写像法の性能評価は知覚的な評価と一致させる必要があるので、推定誤差と色差が直接対応するような評価測度を導入する。最後に、精度の実験的検証および機能面の検討より、提案した方法の有用性が示される。

### 1. はじめに

近年カラー画像の要望が高まるに伴い、計測装置としてのドラムスキャナのカラー化および汎用化が目ざましい。この装置は、回転走査式で試料の色情報を、B/W(白黒), R(赤), G(緑), B(青)などの色分解した濃度信号として高速度で得るものである。色分解はフィルタやミラーなどを用いて光学的に実施されるが、その構造は比較的単純なものである。画像入力装置の色信号の性質は、おもに、このような光学的な色分解特性によって定まるから、ドラムスキャナで開発した手法や考え方を標準として、これらを他の装置にも応用することができる。

ところでカラー画像の必要性は以前から指摘され、いくつかの成果が報告されてきた。たとえば、谷内田ら<sup>1)</sup>はコンピュータビジョンに早くから色情報を利用し、伊藤<sup>2)</sup>はカラー画像処理への取組みを提示した。そして、大田ら<sup>3)</sup>の領域分割、Faugeras<sup>4)</sup>の視覚を考慮した処理、伊藤<sup>5)</sup>の色彩計算法などが報告された。しかし、現実の画像計測系の色信号特性を、人間の色知覚に具体的に結びつけるような問題を扱った研究はまだ少ない。舟久保<sup>6)</sup>の調査報告のみが見受けられる。

計測した画像を色彩として解析する際に、重要となる問題の一つは色信号を色知覚に対応づけることである。この問題が複雑にみえるのは、人間の色知覚は心理物理的な概念であり、いわゆる光のスペクトル特性に関する物理量と、さらに人間の色に対する印象という心理的な量にも基づいているためである。しかしながら、このような色知覚を体系的に表現するために、色彩学の分野でいくつかの表色系が考案されている<sup>7), 8)</sup>。そこで実際問題は、適当な表色系を選んで、色信号と表色系との対応関係を求めることに帰着する。すなわち、色知覚は、計測した色信号から表色系への写像として解釈することができる。

さて本論文では、印刷物、色紙、写真印画紙などを測定を試料と考えて、ドラムスキャナを反射測光方式で使用し、試料の表面色を色信号として計測する。そして表色系としてはマンセル表色系を採用した。色信号特性とマンセル表色系との間に対応関係を作り、色信号から表色系への実用的な写像法を提案する。これにより計測画像を、画素ごとにマンセルの色相、明度、彩度という属性で近似的に表色することを可能にする。

本論文では、色彩学の理論をあまり使用せず、むしろ、これまでの色信号解析の事例と厳密な実験的検証に基づいて解析を展開する。まず2章では、表色の基本的考え方とマンセル表色系の構造を求める。3章でドラムスキャナの測色系を示し、4章でその知覚属性との対応関係を検討する。5章で写像法を展開する。

† Color Signal Characteristics of a Drum Scanner and the Relationship with a Color Specification System by SHOJI TOMINAGA (Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University).

\*\* 大阪電気通信大学工学部精密工学科

## 2. 表色系

### 2.1 基本的考え方

色彩学の分野で考案されている表色系のうちで、CIE (Commission International de l'Eclairage, 国際照明委員会) による XYZ 表色系が国際的に標準化された表色系として知られている。この方法は、照明光源の分光分布、試料表面の分光反射率分布、および観測者の色感度特性を用いて、物体色を数量化するもので、表色には3刺激値  $X, Y, Z$  という三つ組みの測色値を用いる。CIE はこのほかにも XYZ 表色系を基準に派生した表色系をいくつか提案している。このような表色系に基づいた色信号解析の方法については文献6)の検討にゆずる。

しかし XYZ に代表される CIE の表色系は、膨大な情報量を有する画像の色信号解析の立場からは、必ずしも望ましい特徴を備えているわけではない。この理由として二つあげられる。

(1) CIE の表色系は色を定量的に記述することにおいて厳密であるが、直観的に理解することがむずかしい。

(2) 計測が複雑である。ドラムスキャナは高速かつ高分解能の画像入力専用装置であって、色彩計としての本質的な機能をもたない。

一般の人々にとっては、色を心理物理的な測色値で指定するよりも、むしろ色相、明度、彩度といった心理知覚的な尺度を用いるほうが感覚的にわかりやすい。色知覚の3属性の概念はこれまでの色情報処理の研究においても使用されており、とくに Kender<sup>9)</sup> は色相、彩度などを求める計算式を考案した。しかしこれらの計算は色知覚としての根拠が薄く、かつ具体的でなかった。本研究ではマンセル表色系を採用したが、この表色系は3属性で色を同定する表色系としてすでに確立している。これの特徴と使用の際の利点を次にまとめる。

(1) 具体的な物体色の知覚経験に基づいて組み立てられているので、表色系自体が理解しやすい。

(2) 産業界や公共機関に広く実用されている。しかも国際的に規格統一ができています。

(3) 解析方法の性能評価は直接的である。すなわち表色系に準拠する標準色票が発行されている。それで推定した表色値に対応する色票もとの測定試料を比較すれば、直接的な評価ができる。

(4) この表色系に基づいて色彩の調査研究が豊富

になされている。解析を進めるうえで、これらの成果を利用することができる。

なおマンセル表色系は前述の CIE の表色系とまったく独立したものではなく、限られた範囲では対応関係が与えられている。しかしこのような関係を取り入れることは、解析をいたずらに複雑にするだけである。本研究では、CIE の表色系を使用せずに、ドラムスキャナの色信号とマンセル表色系の直接的な対応関係を求める。

### 2.2 マンセル表色系の構造

マンセル表色系<sup>\*</sup> で用いる色知覚の3属性をとくにヒュー (Hue)、バリュー (Value)、クロマ (Chroma) などと呼ぶ。以下では簡単に、色相、明度、彩度という言葉それぞれに使うことにする。まず各属性の定義と数量化の方法について述べる。

(1) 色相  $H$ : 赤、黄、緑などのような光スペクトルの異なった波長の組合せを表す属性である。赤 (R)、黄 (Y)、緑 (G)、青 (B)、紫 (P) を基準の色相にとり、その間に組合せによる黄赤 (YR)、緑黄 (GY)、青緑 (BG)、紫青 (PB)、赤紫 (RP) の中間色を追加して、これら10色相を基本色相とする。そして基本色相をさらに10分割し、全体で100色相を構成する。これらを知覚的に等ステップで円形に配列したものが色相環である (図1参照)。たとえば、赤 (R) の領域は1Rから10Rまで10色相あり、このうち中央の5Rが最も赤らしい赤となる。本論文では、記号  $H$  を用いて色相を数量化する。5Rが  $H=0$  の基準で、色相環上を時計の回転方向に値が増大し、 $0 \leq H < 100$  の範囲の実数値をとるものとする。

(2) 明度  $V$ : 衆知のように明るさ、暗さを特徴づける属性である。理想的な白を最高明度で  $V=10$ 、理想的な黒を最低明度で  $V=0$  とし、その間の灰色には知覚的に等ステップで分割したスケールで明度が与えられている<sup>\*\*</sup>。この明度スケールについては、対応する物理的な反射率との関係がつねに問題にされて

\* この表色系は、米国の画家であり、美術教育家でもあった A. H. Munsell により考案された体系で、1905年に発表された。以後、研究と改良を重ね、1915年に色票集が公刊された。その後、米国光学会 (Optical Society of America) が初版の全色票を測色して、マンセル表色系と CIE 表色系の双方を関連づけるための修正を行った。1943年これを修正マンセル表色系として CIE 色度座標値で発表し、1958年にはこの修正マンセル表色系に準拠した色票集を発行した。今日これを一般にマンセル表色系という。本論文でも修正マンセル表色系をたんにマンセル表色系と呼んでいる。

\*\* 白と黒との間に、知覚的にその差を等しくとった灰色を段階的に配置して、明度スケールとしている。たとえば、中間に位置する灰色には  $V=5$  が割り当てられ、さらに  $V=5$  と黒との中間に位置する灰色に対して  $V=2.5$  が割り当てられる。なお理想的な白とは、光を100%完全に反射するものを意味するが、これに近いものとして酸化マグネシウムの結晶面が白の標準とされる。

きた。たとえば、明度  $V=10$  とは、物体に入射した光をそのまま反射する理想的な白で、反射率は100%である。また  $V=0$  は反射率0%である。しかしその間の両者の関係は線形ではなく、中央の  $V=5$  は反射率約20%に対応する。画像入力装置は通常濃度や反射率を計測するので、適当な実験式を用いて明度を求めることになる。

(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、非常に赤味の強いあざやかな場合と、弱くて灰色に近い場合もある。このため彩度の決め方として、最も色味の強い色(純色)に、同じ明度の灰色を混色してゆき、知覚的に等ステップで変化するようにスケールを定める。無彩色が  $C=0$  で最高値は当初  $C=10$  であった。しかし近年色材の開発とともに、高彩度の色票が製作できるようになったため、 $C$  の最高値は増大しつつある。

さて、上の三つの属性を、無彩色を中心軸とする円筒座標系で図1のように配置すれば、マンセル色立体ができあがる。 $H, V, C$  がそれぞれ回転角、高さ、中心からの距離に対応する。任意の物体色はこの空間の1点として表色される。マンセルの表色記号は  $HV/C$  の形式で、たとえば、記号 4R 4/14 は色相が 4R、明度が4、彩度が14となる。本論文では、この他に空間座標を明確化するために  $(H, V, C) = (99, 4, 14)$  の形式も用いる。なお無彩色は色相、彩度をもたないので、マンセル記号は特別にNを用いて明度だけで表記される。

### 2.3 色差の表現

マンセルの色空間の特徴は、円筒座標系の各スケールが、3属性  $H, V, C$  に対応して、知覚的に等ステップになっていることである。しかしながら、厳密に言えば、各座標軸について等歩度性\*が成立しても、3次元の空間構造としてそれは保障されない。これは空間内の2点間の直線距離が同じでも、つねに同一の色差(色差)の知覚を与えるとは限らないことを意味する。この意味で、マンセル色空間を通常の数学的なユークリッド空間として取り扱うことができない。

\* 知覚的に等ステップまたは等間隔尺度の性質を等歩度性という。

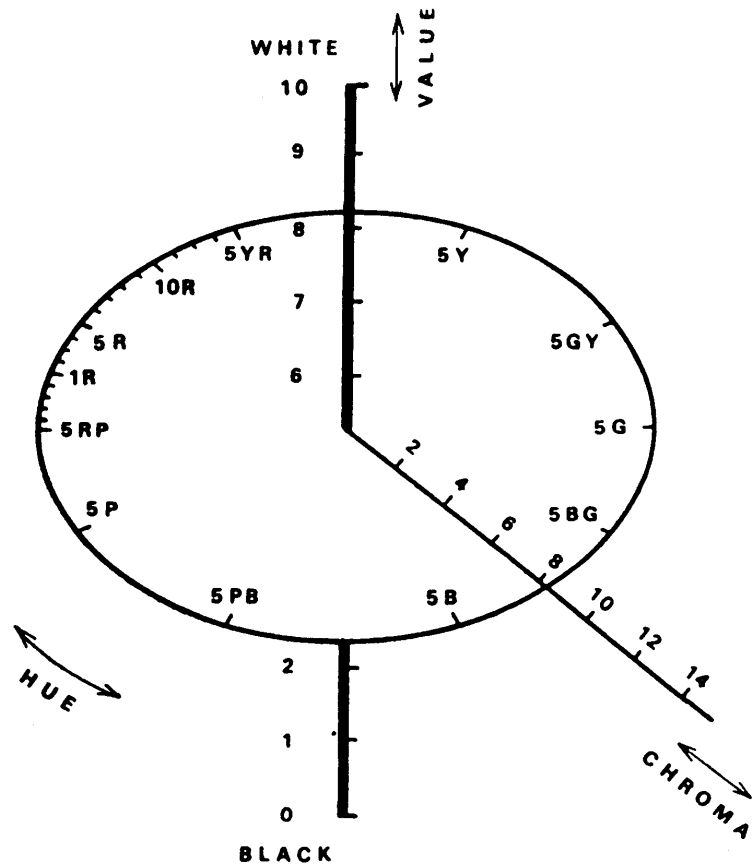


図1 マンセル色空間  
Fig. 1 The Munsell color space.

たとえば、図1において、明度の差が1ステップ  $\Delta V=1$  と彩度の差が1ステップ  $\Delta C=1$  は同じ知覚差に対応しないことが指摘されている。

このためマンセル空間で色差を評価するための実験的な公式(色差公式)がいろいろと提案された。色差式は表色結果の定量的解析や、許容誤差を定める場合の評価尺度に用いるもので重要である。本研究では、Godloveの公式を採用する。この公式は多くの実験的事実に基づいているとともに、色空間のユークリッド的な取扱いも考慮されているので解析には好都合である。

[Godloveの色差式]<sup>10)</sup>マンセル空間内の2点  $(H_1, V_1, C_1)$  と  $(H_2, V_2, C_2)$  の色差  $\Delta E$  を次式で定義する。

$$\Delta E = \left\{ 2C_1C_2 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi}{100} \Delta H \right) \right) + (\Delta C)^2 + (4\Delta V)^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

ただし、

$$\Delta H = |H_1 - H_2|, \Delta V = |V_1 - V_2|$$

$$\Delta C = |C_1 - C_2|$$

ここで上式の意味を簡単に説明する。(1)式は色差を円筒座標系で記述している。右辺第1項は色相 $H$ に対応する回転の角度差による色差成分を表し、第2項と第3項はそれぞれ彩度 $C$ に対応する中心からの距離、および明度 $V$ に対応する高さの差による色差成分を表す。いま色差を距離に関連づけるために、(1)式を直交座標系で記述する。このとき座標値( $H_i, V_i, C_i$ )と( $H_2, V_2, C_2$ )に変換

$$\left. \begin{aligned} P_{1i} &= C_i \sin\left(\frac{2\pi}{100} H_i\right) \\ P_{2i} &= C_i \cos\left(\frac{2\pi}{100} H_i\right) \\ P_{3i} &= V_i \end{aligned} \right\} (i=1, 2) \quad (2)$$

を実施して、(1)式を直交座標値( $p_{11}, p_{21}, p_{31}$ )と( $p_{12}, p_{22}, p_{32}$ )を用いて表せば、次式が得られる。

$$\Delta E = \{(p_{11} - p_{12})^2 + (p_{21} - p_{22})^2 + 16(p_{31} - p_{32})^2\}^{1/2} \quad (3)$$

この展開からも明らかなように、マンセル空間の色差知覚に対する評価尺度は次の2点に要約される。

(1) ( $H, C$ ) 平面(クロマチックネス平面と呼ぶことにする)内では、色差はユークリッド距離として定義できる。

(2) クロマチックネス平面内の色差と明度差の間には、 $\Delta V = 4 \times \Delta C$  のように4倍の知覚差がある。すなわち明度の1ステップの差は、彩度の4ステップの

差に対応する。

さて、本研究で使用したマンセル標準色票は日本色彩研究所で作られた CHROMATON 707 である。色票数は707で、色相は24種類、明度は $1.5 \leq V \leq 9.5$ の範囲、また彩度は色相に依存して最高 $8.5 \leq C_{\max} \leq 14$ の値をとる。なお、色票は数種類の色材を適当に調色して製作されるが、実際の製作は人間の知覚のみに基づいているのではない。マンセル色票系の物理的な測色の基準は日本工業規格として制定されており<sup>\*</sup>、その値はCIEのXYZ表色系の座標値で定められている。したがってこの定められた基準値を許容範囲内で再現するように製作されている。

### 3. 色信号計測系

ドラムスキャナは阿部設計2605型で、図2に本研究に関する光学系の概要図を示す。ドラムに巻きつけた試料を回転させ、これに2方向から照明する。試料表面から反射した光は色分解系に導かれ、B/W, R, G, Bの4成分に分光した後、光電変換器で検出される。この色分解は波長選択性のダイクロイックミラーとKodakのラッテンフィルタを組み合わせることで実施している。

この機構では、まず試料からの光の一部がビームスプリッターで白黒測光用として反射される。透過した光に対して、ミラーは青の波長領域の光のみを反射させ、赤および緑領域の光を透過させる。このうち赤の光が2番目のミラーで反射され、最後に緑の光が残る。これらの成分光がフォトマルチプライヤに入るが、分解を完全にするために、フィルタがそれぞれに挿入されている。このような色分解系の仕様は色信号特性を決定するので重要である。標準的な仕様や特性は文献11), 12)で示されている。

ここではマンセル表色系との良好な対応関係を得るためにフィルタで特性を改善した。使用したラッテンフィルタは次のとおりである。

B/W 用 : 106, 80 A, CC 50

C, R 用 : 25, G 用 : 12,

CC 50 G, B 用 : 47 B

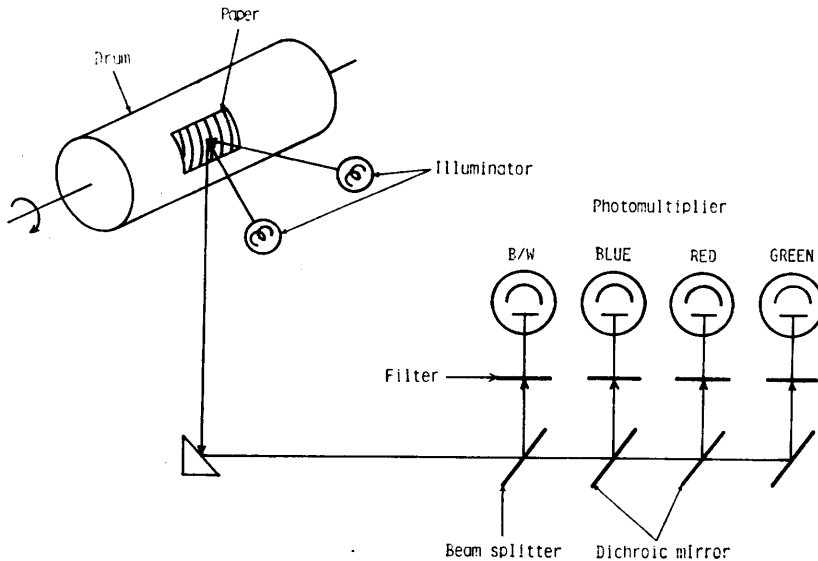


図2 使用したドラムスキャナの光学系概要図

Fig. 2 Schematic diagram of the optical system in a drum scanner used.

\* 日本工業規格 (JIS Z 8721)

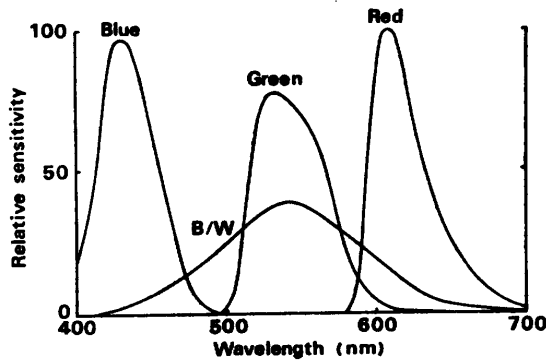


図3 計測系の色応答関数

Fig. 3 Color response functions of the measuring system.

このうち B/W 用の3枚は後述する比視感度への変換フィルタで、他の R, G, B のフィルタは色分解の補正を目的としている。

さて B/W, R, G, B の各成分光は光学濃度として測定される。濃度は反射率を対数で表したもので、次式のように定義される。

$$D = -\log_{10} \rho \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\int E_{\lambda} \rho_{\lambda} F_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{\int E_{\lambda} F_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda} \quad (5)$$

ここで、

$\rho$ : 試料の反射率

$\rho_{\lambda}$ : 試料の分光反射率

$E_{\lambda}$ : 光源 (ハロゲンランプ) の放射エネルギー分布

$F_{\lambda}$ : 色分解系の分光透過率

$S_{\lambda}$ : 検出器 (フォトマルチプライヤ) の分光感度分布

である。(5)式の積分範囲は可視領域の全波長にわたる。色分解特性  $F_{\lambda}$  と検出器感度  $S_{\lambda}$  を結合した総合分光感度分布  $F_{\lambda} S_{\lambda}$  の項が計測系の色応答関数となる。 $F_{\lambda}$  の値はミラーやフィルタの複数の分光特性を重畳して算出した。図3に4種類の応答曲線を示す。

計測濃度は、基準白紙を  $D=0$  とする相対値で、 $0 \leq D \leq 4$  の範囲の値をとる。定義式(4)、(5)から基準白紙とは  $\rho_{\lambda}=1$  の理想的な白紙を意味するが、実際には N9.5 の標準色票を使用した。4種類のこのような相対濃度  $D_{B/W}$ ,  $D_R$ ,  $D_G$ ,  $D_B$  が各8ビット(256レベル)に量子化され、その計測および制御には MELCOM 70/20 を使用している。色票の計測にあたって、測光アパーチャは  $0.5 \times 0.5$  (mm<sup>2</sup>) とし、信頼性を高めるために、 $10 \times 10$  正方領域の100画素の

平均濃度値を使用した。この条件では、濃度  $D=1$  程度の色票について、標準偏差は0.02以下となった。

#### 4. 色信号と知覚属性の基本的対応

本章では、色信号とマンセル表色系の3属性との間に基本的な対応関係を得る。画像処理において明度が最も重要な属性になるので、R, G, B 信号から明度情報を近似的に求めるのではなく、B/W 信号を単独に用いることにする。したがって、B/W から明度を、また R, G, B から色相、彩度といったクロマチックネス(知覚色度)の情報を、別々に抽出するという2種類の関係を検討する。

##### 4.1 B/W 信号と明度

B/W の計測値から明度を得るための手続きは次の2点に集約できる。

- (1) B/W の応答関数を比視感度曲線に適合させる。
- (2) 明度のスケールを表す実験式を作る。

(1)については、人間の眼に感ずる明るさは可視光でも波長によって変化し、555 nm 付近の波長で最大となることが知られている。この波長特性は比視感度と呼ばれ、色知覚のうちでも無彩色成分に対する応答関数である(文献8)の p. 4 参照)。したがって B/W 信号の応答関数をこの感度曲線に一致させれば、計測信号は色味などに依存することなく、真に明るさ情報のみを含むことになる。図3の B/W 曲線は適合結果で、比視感度のおおよその姿を表している。

(2)については、実用面から単純な変換式にすべきである。濃度を直接明度に対応させることも一つの方法である。色彩学の分野では、反射率をパラメータとする実験式が数多く提案されてきた。ここでは、マンセル自身が初期の頃に提案した実験式が、精度と簡便性の点で比較的優れていることがわかった。これは、反射率  $\rho_{B/W}$  の平方根を明度に対応させる単純なもので、

$$V = 10 \sqrt{\rho_{B/W}} \quad (6)$$

で記述する。

ここで実例をあげて説明する。マンセル色票を色見本として使用する。それらは無彩色 N が17種類、および有彩色で色相 5R, 3G, 5B の色票が33種である。明度が広く分布するように色票を選んだが、有彩色についてはさらに彩度も異なる。図4にまず明度と濃度の直接的な関係を示す。横軸は測定値を基準化した値で、縦軸は色票の正しい  $V$  の値である。次に図5

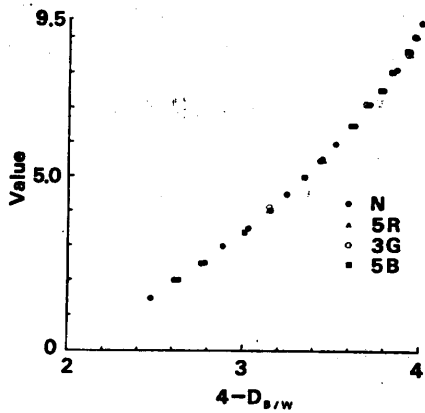


図 4 明度と濃度の関係

Fig. 4 Relation between the value and the density.

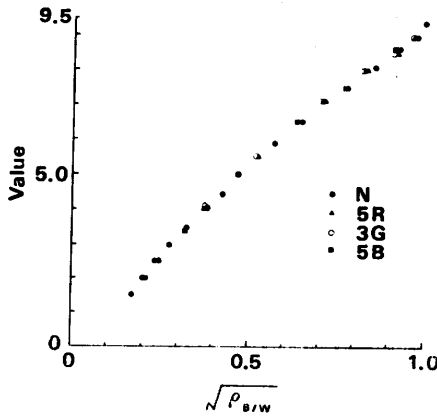


図 5 明度と反射率の平方根との関係

Fig. 5 Relation between the value and the square root of the reflectance.

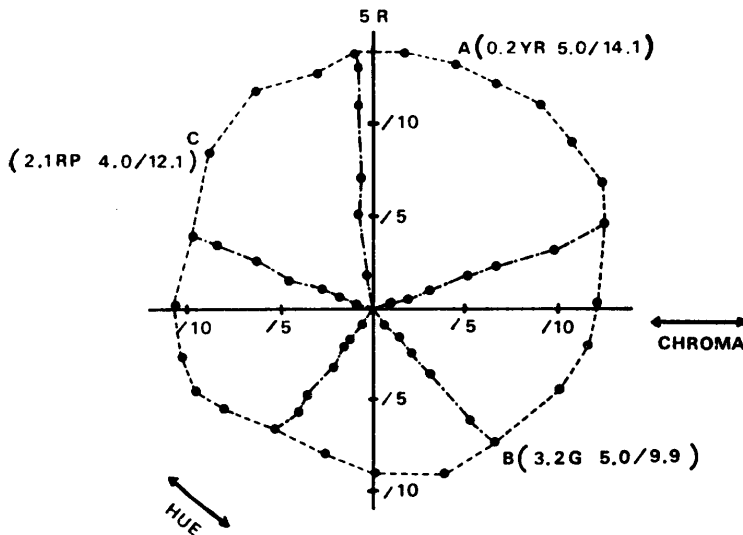


図 6 使用した色見本のクロマチックネス平面上での位置

Fig. 6 Location of color samples used in the chromaticness plane.

は  $\sqrt{\rho_{B/W}}$  と  $V$  の関係を示す。線形性は後者のほうが優れており、(6)式の妥当性がわかる。また、これらの図から測定値と明度の関係は、有彩色と無彩色の区別なく一致していることがわかる。このことは項目(1)の結果として、純粹に明度情報のみが抽出できたことを意味する。

#### 4.2 R, G, B 信号とクロマチックネス

クロマチックネスは色相と彩度を総合した知覚属性で2次元平面上で表示する。均等色空間を作りたいという試みは、歴史的に数多くなされてきたが、その本質的な議論は人間の視覚系の生理的モデルを考慮して展開されてきた。いわゆる網膜レベルにおける色応答関数(スペクトル感度特性)と色知覚空間との関係が検討されてきた。このうちクロマチックネスについては、2種類の色応答の差でモデル化することが多い(たとえば、文献7, p. 557)。Faugeras<sup>4)</sup>の色信号解析もこのモデルに基づいていた。たとえば、緑の応答を基準にとり、赤および青の応答との間で差応答を作る。これらを2次的に配置してクロマチックネスを表現するやり方である。

そこで上述のモデルを採用し、2次元直交座標系の  $(D_B - D_G, D_G - D_R)$  でクロマチックネスの近似的な表現を求めることにした。これは濃度差だけの計算できわめて簡便である。

実例で説明する。なお R, G, B の応答関数は図3に示したとおりである。まず、52種類の色票を、図6に示すように、できるだけ一定彩度の円および一定色相の直線上に並ぶように選択した。ドットが各色見本のクロマチックネス平面上で正しい位置を示している。図7は計測結果で、各色見本を計測して座標系  $(D_B - D_G, D_G - D_R)$  上に描いたものである。二つのグラフ間で、A-A', B-B', C-C' のように色見本の対応をとれば、両グラフは同形で、円や直線の軌跡がほぼ保存されていることがわかる。すなわち  $(D_B - D_G, D_G - D_R)$  による近似表現が妥当であり、これを極座標系とみれば、回転角と径が  $H$  と  $C$  にそれぞれ対応する。

#### 5. マンセル表色系への写像法

前章で色信号と知覚属性の基本的関係を調べ、色信号から変換した観測値

$\sqrt{\rho_{B/W}}, D_B - D_G, D_G - D_R$  で座標系を構成すれば、知覚属性がこの空間内で近似表現できることがわかった。そこで本章では、任意の色見本に対して表色値  $H, V, C$  を簡便に推定するために、色信号をマンセル空間へ写像する実用的な方法を展開する。

5.1 写像のモデル

まず、ドラムスキャナから得られる観測値を等価的に  $\sqrt{\rho_{B/W}}, D_R, D_G, D_B$  とみなし、これらを縦ベクトル

$$\mathbf{s} = [\sqrt{\rho_{B/W}}, D_R, D_G, D_B]^T \quad (7)$$

で表す。記号  $T$  は行列の転置を示す。この  $\mathbf{s}$  で定まる観測空間  $S$  は、反射率および濃度の値域から、実4次元空間  $R^4$  の領域  $\{[0, 1], [0, 4], [0, 4], [0, 4]\}$  に限定される。

他方、マンセル空間は本来円筒座標  $(H, V, C)$  で記述されるべきであるが、写像計算の都合から、ベクトル

$$\mathbf{p} = \left[ C \sin\left(\frac{2\pi}{100} H\right), C \cos\left(\frac{2\pi}{100} H\right), V \right]^T \quad (8)$$

によって直交座標系で記述する。この  $\mathbf{p}$  で定まるマンセルの表色空間  $P$  は、空間  $S$  と異なり、実3次元空間  $R^3$  の部分領域である。しかも実際には、マンセル色票が存在している領域に限定されることに注意する。

さて、観測空間  $S$  とマンセル空間  $P$  が与えられたとき、 $S$  の各観測値に対して  $P$  の表色値をただ一つ対応させるような写像  $f: S \rightarrow P$  を求める。本研究ではこれを  $R^4$  から  $R^3$  への写像

$$\mathbf{p} = \mathbf{F}\mathbf{s} \quad (9)$$

で実現することにする(図8参照)。行列  $\mathbf{F}$  は写像を表す  $3 \times 4$  変換行列で、多数の色票の実測データに基づいて決定する。この写像のモデルの数学的な性質は次のとおりである。

(1) 線形である。任意のスカラー  $\alpha, \beta$  および観測値  $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2 \in S$  に対して

$$f(\alpha\mathbf{s}_1 + \beta\mathbf{s}_2) = \alpha f(\mathbf{s}_1) + \beta f(\mathbf{s}_2) \quad (10)$$

を満たす。

(2) 単射でない。すなわち

$$f(\mathbf{s}_1) = f(\mathbf{s}_2) \Rightarrow \mathbf{s}_1 = \mathbf{s}_2 \quad (11)$$

が成立するとは限らない。

性質(1)の線形性は本写像法の大きな特徴である。

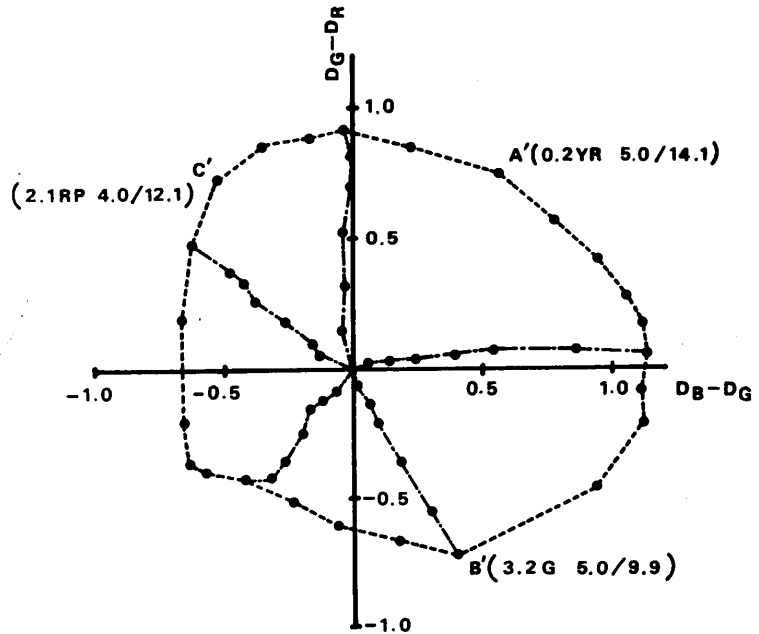


図7 観測した色見本の  $(D_B - D_G, D_G - D_R)$  平面上での位置  
Fig. 7 Location of the observed samples in the  $(D_B - D_G, D_G - D_R)$  plane.

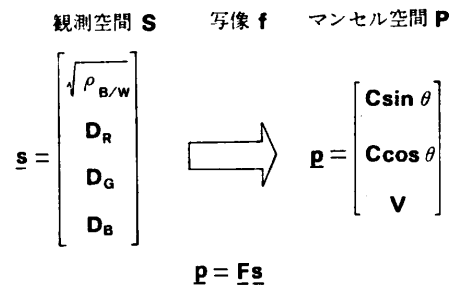


図8 写像モデル  $(\theta = \frac{2\pi}{100} H)$

Fig. 8 Mapping model  $(\theta = \frac{2\pi}{100} H)$ .

任意の色見本のマンセル表色値は、マンセル表色値が既知である色見本を線形補間することによって推定する。すなわち線形推定が基本となっている。性質(2)は空間  $R^4$  から  $R^3$  への縮小写像であることに起因する。観測値と表色値の間に1対1の関係を求めず、異なった特性をもつ4種類の計測色信号の集合から、有意な知覚情報を抽出して表色値と対応づけるからである。

5.2 写像の計算法

変換行列の具体的な求め方を述べる。いま  $n$  種類のマンセル色票を実測したと仮定する。それらの観測値  $\mathbf{s}_i (i=1, 2, \dots, n)$  と対応するマンセル表色値  $\mathbf{p}_i$  のそ

それぞれをまとめて行列で表す.

$$\left. \begin{aligned} S &= [s_1, s_2, \dots, s_n] \\ P &= [p_1, p_2, \dots, p_n] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

行列  $S$  と  $P$  の大きさは  $4 \times n$  と  $3 \times n$  である. このとき  $F$  に関する行列方程式

$$P = FS \quad (13)$$

が成立しなければならない. この方程式の解が写像を定める変換行列そのものになる. (13)式は  $F$  の要素に関する連立方程式にはかならないが, その最小2乗解を能率よく求めるために, 擬似逆行列を利用する. すなわち  $S$  の擬似逆行列を  $n \times 4$  行列  $S^+$  で定義すれば,  $F$  の最小2乗近似解  $\hat{F}$  は

$$\hat{F} = PS^+ \quad (14)$$

と簡潔に求まる.

ここで擬似逆行列  $S^+$  を計算するために  $S$  の特異値分解を用いた<sup>13)</sup>. いま  $S$  の特異値分解が

$$S = U \Sigma V^T \quad (15)$$

と求められたとする. ただし  $U$  は  $4 \times 4$  直交行列,  $V$  は  $n \times n$  直交行列である. また  $\Sigma$  は, 要素が  $i \neq j$  ならば  $\sigma_{ij} = 0$  で,  $\sigma_{ii} = \sigma_i \geq 0$  なる値をもつ  $4 \times n$  対角行列である.  $\sigma_i$  が一般に特異値と呼ばれる. この分解を用いれば,  $S^+$  は

$$S^+ = V \Sigma^+ U^T \quad (16)$$

と表され, これを(14)式に代入すれば, 実際的な解となる. ただし,  $\Sigma^+$  は  $1/\sigma_i$  を対角要素とする  $n \times 4$  対角行列である. なお現在, 特異値分解の効率のよい計算プログラムが開発されているので, (15)式の数値計算は容易である.

さて, 上で求めた変換行列を写像モデルに代入すれば, 結局マンセル空間への写像は

$$\hat{p} = \hat{F}s \quad (17)$$

で計算されることになる.  $\hat{p}$  は色見本に対するマンセル表色値の推定値である. また知覚属性を得るには円筒座標系に逆変換すればよい.

$$\left. \begin{aligned} \hat{H} &= \frac{100}{2\pi} \tan^{-1}(\hat{p}_1/\hat{p}_2) \\ \hat{V} &= \hat{p}_3 \\ \hat{C} &= (\hat{p}_1^2 + \hat{p}_2^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ただし,  $\hat{p} \triangleq [\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3]^T$

### 5.3 性能評価

提案した写像法の性能を実験的に検証する. まず, 変換行列を作成するために, 約 350 種類の色票を, マンセル空間内でできるだけ一様に分布するように選んだ. これらの実測データを用いて, 前節の手順で解を

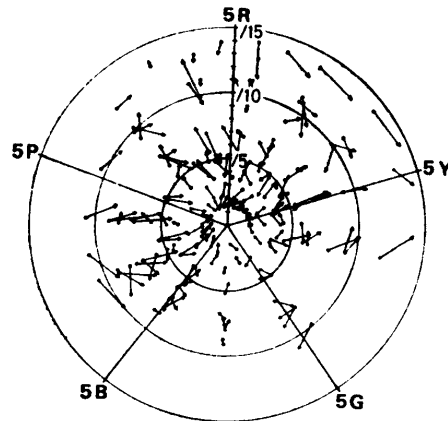


図9 クロマチックネス平面上へ射影した表色結果  
Fig. 9 Color-specification results projected on the chromaticness plane.

求め, 変換行列を次のように得た.

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} -0.4 & 1.0 & -13.5 & 12.7 \\ 0.4 & -14.1 & 11.7 & 2.3 \\ 9.4 & 0.2 & -0.1 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

次に, テスト用の色見本として,  $\hat{F}$  の作成に用いた色票と違う色票を約 300 種類使用した. 各色票の観測値を(17)式で順次マンセル空間へ写像して表色値を求めた. そしてこの推定した表色値と正しいマンセル表色値とを比較することによって, 精度の検討を行った.

これらの比較を図9に示す. 便宜上, 表色値 ( $\hat{H}, \hat{V}, \hat{C}$ ) はクロマチックネス平面への射影成分 ( $\hat{H}, \hat{C}$ ) のみで表示している. 図中で各ベクトルが色見本を表しており, 始点と終点はそれぞれ正しい表色値 ( $H, C$ ) と計測して推定した値 ( $\hat{H}, \hat{C}$ ) を示している. すなわちベクトルの長さが推定誤差の大きさを表し, 知覚的な色差に対応する. 誤差の分布は一見ランダムなようにみえる. しかし部分的には, 表色値の移動の仕方に一定の傾向をもつものがみられる. たとえば, 色相 YR 付近で彩度の高い色見本は Y の方向へ誤って推定される. また色相 B と G のものはそれぞれ G と B の方向へ移動する傾向をもつ.

このような表色結果を総合して評価するために, 2章で述べた色差式を使用する. すなわち精度の表現は定量的で, しかも知覚的な評価と一致しなければならない. このため推定誤差を(1)式の色差  $\Delta E$  で定義することにする. このとき, 属性  $H, V, C$  についての誤差を

$$\left. \begin{aligned} \Delta \hat{H} &= |H - \hat{H}|, \Delta \hat{V} = |V - \hat{V}| \\ \Delta \hat{C} &= |C - \hat{C}| \end{aligned} \right\} \quad (20)$$



表 1 色の許容差のレベル<sup>14)</sup>

Table 1 Level of color tolerances.

| 厳密度の名称 | $\Delta H$ | $\Delta V$ | $\Delta C$ |
|--------|------------|------------|------------|
| AAA 級  | 2/C        | 0.05       | 0.2        |
| AA 級   | 3/C        | 0.10       | 0.4        |
| A 級    | 4/C        | 0.20       | 0.6        |

$\Delta H$  の許容差は  $C$  の値に依存し、ここで示す許容差は  $C < 4$  の場合の目安とされている。

とおけば、総合的な推定誤差  $\Delta \hat{E}$  は次式のように記述できる。

$$\begin{aligned} \Delta \hat{E} &= \left\{ 2CC \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi}{100} \Delta H \right) \right) \right. \\ &\quad \left. + (\Delta \hat{C})^2 + (4\Delta \hat{V})^2 \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ (p_1 - \hat{p}_1)^2 + (p_2 - \hat{p}_2)^2 \right. \\ &\quad \left. + 16(p_3 - \hat{p}_3)^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (21)$$

この単位は  $\Delta E$  のそれと同じで、たとえば  $\Delta \hat{E} = 1$  は 1 彩度ステップの差、あるいは 1/4 明度ステップの差に対応する。

上述の実験において、下記の結果を得た。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \hat{H} &= 3.28, \quad \Delta \hat{V} = 0.18 \\ \Delta \hat{C} &= 0.69, \quad \Delta \hat{E} = 1.28 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

これらはいずれも平均値である。ただし  $\Delta \hat{H}$  については、 $C \geq 0.5$  の有彩色に関する平均である。これらの精度には、ドラムスキャナの計測精度、および標準マンセル色票として使用した色票自体の誤差なども含まれている。表 1 に相対比較の参考のために、色の許容差の程度について提案されているレベルを示す<sup>14)</sup>。これらのレベルは色票などの色彩管理の目安として使用される。AA 級以上は厳密な許容差を意味し、色票製作の目標にされる。A 級は実用的許容差と呼ばれる。色相は A 級に達しないが、明度と彩度は A 級に準ずる精度が得られた。

このように本写像法は比較的良好な精度を有するものと認められる。機能面については、とくに処理手順の簡便さに注目すべきである。基本的には、計測色信号に一つの行列を作用させるだけで、マンセル表色値を得るというきわめて単純なものである。この点からも本方法はコンピュータ向きで、画像処理に適した色信号解析の手法といえる。

## 6. おわりに

ドラムスキャナの色信号特性を調べ、計測色信号をマンセル表色系へ写像する方法を提案した。対象は色

紙、印刷物などの表面色で、これをマンセルの色相、明度、彩度の 3 属性で表色することを試みた。まず、B/W 信号と明度、および R, G, B 信号とクロマチックネスの間に基本的な関係を作ることができた。次に、色信号をマンセル空間へ写像して表色値を得るための実用的な方法を展開した。この写像の性質を調べ、能率的な計算法を示した。写像法の性能を実験的に検証し、精度は平均推定誤差 (Godlove の色差) で 1.28 程度であることが判明した。

本論文では、色彩学にあまりとらわれることなく、コンピュータ向きの実用的な色信号解析を展開した。ここで本解析法の特徴をまとめておく。

- (1) 標準色票を用いる実験的検証を基盤とした。
- (2) 表色値を決定する手順を、一つの行列演算のみに簡素化した。
- (3) 性能を評価するための測度を与えた。

以上の結果として、計測画像を、各画素ごとに色知覚との対応を取りながら、知覚空間へ写像する一つの方針を得たことになる。したがって今後、表色精度の向上、知覚属性の画像解析への適用などが課題となる。なお表色の仕方を 3 属性による定量的表現に限定せず、色名といった言葉であらく表色することも有用である。これについては検討を進めている<sup>15)</sup>。

**謝辞** 色彩学のご教示をいただいた本学納谷嘉信教授、電子技術総合研究所高浜幸太郎主任研究官、ドラムスキャナの資料を検討していただいた(株)阿部設計阿部俊雄社長、色票のデータを提供していただいた日本色彩研究所平井敏夫理事、さらに計測にご協力いただいた元本学学生の大谷昇司(現大阪コンピュータ工業)、鈴木知己(現コンピュータサービス)、池田秀二(現神鋼鋼線工業)の各氏に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Yachida, M. and Tsuji, S.: Application of Color Information to Visual Perception, *Pattern Recogn.*, Vol. 3, No. 3, pp. 307-323 (1971).
- 2) Ito, T.: Towards Color Picture Processing, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 2, No. 4, pp. 347-354 (1973).
- 3) 大田友一, 金出武雄, 坂井利之: 領域分割処理によるカラー画像情報の構造化, 情報処理, Vol. 19, No. 12, pp. 1130-1136 (1978).
- 4) Faugeras, O. D.: Digital Color Image Processing within the Framework of a Human Visual Model, *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, Vol. ASSP-24, No. 4, pp.

- 380-393 (1979).
- 5) Ito, T.: Digital Color Picture Processing, Proc. European Signal Processing Conf., pp. 71-81 (Sep. 1980).
  - 6) 舟久保登: ドラム・スキャナにより入力したカラー画像の色彩情報処理法, 電総研彙報, Vol. 45, No. 3, 4, pp. 78-96 (1981).
  - 7) Wyszecki, G. and Stiles, W. S.: *Color Science*, John Wiley & Sons, New York (1967).
  - 8) 納谷嘉信: 産業色彩学, 朝倉書店, 東京 (1980).
  - 9) Kender, J. R.: *Saturation, Hue, and Normalized Color: Calculation, Digitization, Effects, and Use*, Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University, Pennsylvania (1976).
  - 10) 日本色彩学会編: 色彩科学ハンドブック, p.263, 東京大学出版会, 東京 (1980).
  - 11) 阿部俊雄: 画像データ入出力装置(I), 映像情報(Industrial), Vol. 14, No. 8, pp. 53-56 (1982).
  - 12) 富永昌治: ドラムスキャナの色信号特性と色分類の一方法, 電子通信学会技術研究報告, PRL 82-16, pp. 9-16 (Jul. 1982).
  - 13) Forsythe, G. E., Malcolm, M. A. and Moler, C. B.: *Computer Methods for Mathematical Computations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1977).
  - 14) Judd, D. B. and Wyszecki, G.: *Color in Business, Science, and Industry* (本明 寛 訳: 応用色彩学, pp. 325, ダイヤモンド社, 東京 (1964)).
  - 15) Tominaga, S.: Computer Perception of Color Measured with an Image Input Device, Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 225-230 (June 1983).

(昭和58年9月19日受付)

(昭和59年1月17日採録)