

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†

富 永 昌 治^{††}

汎用のカラー画像入力装置を用いて色紙や写真印画紙などの表面色を観測し、その計測色信号を表色系の上へ写像することによって色知覚を推測する方法を開発した。本論文では、画像入力装置を使用することによる測色の過程をコンピュータ・カラー・ビジョンと呼んでいる。色信号は B/W, R, G, B の4成分計測できることを前提とし、表色系は色相、明度、彩度という心理知覚量で定義されるマンセル表色系である。この表色系は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、人間にとって大変理解しやすい。しかしその反面、計測量との対応がつけにくい色空間である。本論文では、画像計測系とこの表色系との写像関係を、色彩学の測色論に基づいて理論的に解析している。解析の参考のために CIE(国際照明委員会)の $L^*a^*b^*$ 表色系を採用する。この構造および現実の画像計測系の機能の検討より、(1)実効反射率という新しい計測量を定義すればよいこと、(2)1/3乗則という非線形変換は写像に有効であること、の2点が明らかになる。この原理に基づいて計測系から表色系への写像を 3×5 の行列で実現し、性能を色票を用いた実験で検証する。以前の簡便法と比べて、性能は著しく向上している。具体的な応用として、カラー写真印画紙の表面色の推定に適用する。開発した方法と厳密な分光測色法による結果とを対比し、実用面において、その有用性が実証される。

1. はじめに

色知覚が人間の視覚系において重要な役割を演じているように、コンピュータビジョンやパターン認識の研究において^{1),2)}、色情報の必要性は今日ますます高まりつつある。色情報の取扱い方を広くみれば、“色彩”と“スペクトル”という2通りの概念が存在するようである。前者は人間による知覚を前提とする立場で、光の客観的な物理量のみならず、色刺激に対する心理的印象も含めた心理物理量が求められねばならない。後者は、マルチスペクトル画像処理のように、知覚的な側面はすべて無視して、スペクトル解析を実施する。Brown はこのような解析をマルチスペクトル明度計算 (multi-spectral lightness computation) という言葉で呼んでいる³⁾。

本論文では、“色彩”の立場から色情報の計測および処理の方法を検討する。すなわち、カラー画像入力装置を用いて色信号を計測し、これを適切な表色系の上で表示することによって色知覚を推測するための方法を開発する。光学的な画像入力装置は計算機の眼の役目をするから、これによる観測値から計算で色知覚を推測する過程を、人間の色覚 (human color vision) に対応して、コンピュータ・カラー・ビジョンと呼ぶ

ことができる。色彩学の分野では、色知覚を表現するために表色系が提案されている⁴⁾。このためコンピュータ・カラー・ビジョンの問題は、カラー画像の色信号計測系と適切な表色系との間に明瞭な写像関係を作る問題として定義することができる。任意の物体色は、このとき得られた関係に従って、計測信号を表色空間へ写像することによって知覚される。

図1は本研究におけるカラービジョンの方針を示している。計測対象は色紙や写真印画紙などの試料の表面色で、計測装置として汎用のドラムスキャナを使用し、試料表面から反射した光の B/W(白黒), R, G, B 成分を観測する。これらの計測データで色信号空間を形成する。他方、表色系には、色立体として一般に最もよく知られたマンセル表色系を採用し、任意の表面色をマンセルの色相 (Hue), 明度 (Value), 彩度 (Chroma) で指定する。そして、カラー画像の高速処理を目的として、計測系と表色系の間に直接的な関係を求める。すなわち計測した色信号を直接マンセル色空間へ写像する方針である。

筆者は、本論文に先立って、上記方式の可能性を調べるために文献5)で基礎的検討を行った。そこではドラムスキャナの測色系の構造とマンセル表色系の特徴について論じた。そしてこの両者の間に、測色の理論にとらわれることなく、経験則に基づいた簡便な関係を導くことができた。本論文では、測色論に基づいた理論的な解析を展開する。このために、色彩学の分野において得られている測色に関する成果を参照す

† A Mapping Method for Computer Color Vision Based on the Theory of Colorimetry 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

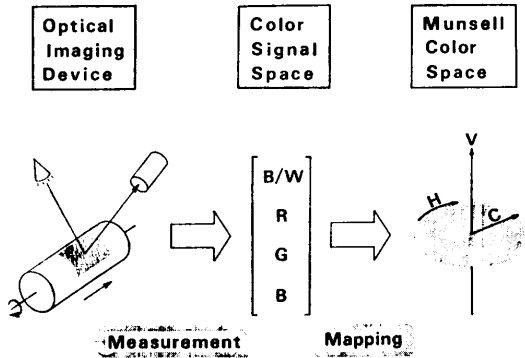


図1 コンピュータ・カラー・ビジョンの過程
Fig. 1 Process for computer color vision.

る。標準的な測色の方法やその意味を解釈し、本カラービジョン問題との対比を行う。画像入力装置は一般の色彩計とは目的や機能が本質的に異なるので、本問題に適した計測量を定義することにする。これにより画像計測系と表色系の間に明瞭な写像関係を作ることができ、しかも精度は優れていることがわかる。

まず、2章で測色の理論の要点を述べる。3章で写像法の原理を明らかにする。4章では、写像の数学的モデルを定め、性能を実験的に示す。5章でカラー写真印画紙への具体的な応用を図る。厳密な測色法と比較することによって、理論面のみならず実用面においても良好であることが示される。ドラムスキャナとマンセル表色系については文献5)で論じたので、ここでは重複をさせている。なお、計測系としては、他の光学的カラー画像計測装置にも適用可能である。

2. 測色の理論

2.1 色の数量化と表示

光源から放射された光が物体に入射し、その反射光が人間の眼に入射して色の知覚を生ずる⁶⁾。CIE(国際照明委員会)は、色知覚の生理的メカニズム自身を表現するものではないが、色を客観的に数量化するための標準的な表示方法を定めている。

この方法は、光源の分光分布、それによって照射される物体の分光反射率、および人間の視覚系の色感度特性を代表する等色関数を用いて、物体色を表現するものである。色を決定するには基本法則として三つの独立な量が必要であるが、このために次式で定義される三刺激値という三つの数値を使用する。

$$X = K \int E(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1a)$$

$$Y = K \int E(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (1b)$$

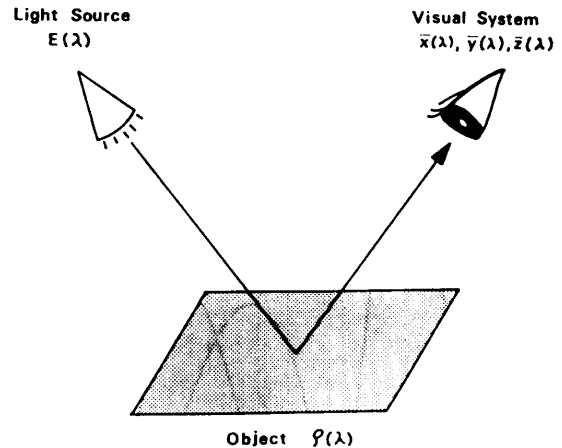


図2 物体色の観測
Fig. 2 Observation of an object color.

$$Z = K \int E(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (1c)$$

ここでKは

$$K = 100 / \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

で与えられ、各記号は以下のように定義される。

$E(\lambda)$: 光源の分光エネルギー分布

$\rho(\lambda)$: 物体の分光反射率

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$: 標準観測者の等色関数

K: 正規化定数で、 $\rho(\lambda)=1$ の完全白色物体に対して $Y=100$ となる。

各積分の区間は可視光の波長領域(約400~700nm)である。これらの計算は以下のような観測の過程に基づいている(図2参照)。

- (1) 分光分布 $E(\lambda)$ をもつ光源からの照明光は、分光反射率 $\rho(\lambda)$ の物体表面で反射する。
- (2) 反射光は放射エネルギー $E(\lambda)\rho(\lambda)$ をもち、人間の眼に入射する。
- (3) 人間の眼は等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を有し、入射光はこれらで重みづけされて、3成分に分解される。
- (4) 可視領域でのそれらの積分量を、標準観測者に対する物体色の刺激値という。

等色関数を図3に示す。関数 $\bar{y}(\lambda)$ は比視感度曲線と定められているので、刺激値Yは視感反射率と特別に呼ばれたりする。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

$$x = X/(X+Y+Z) \quad (3a)$$

$$y = Y/(X+Y+Z) \quad (3b)$$

を定義し、これらの2次元座標 (x, y) で表現する。

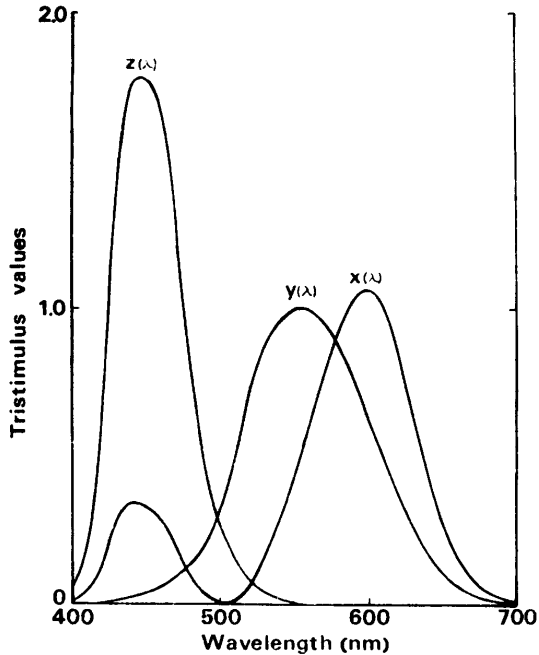


図3 等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (2度視野)

Fig. 3 Color-matching functions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, and $\bar{z}(\lambda)$ (2° visual field).

これは図4のような色度図上で具体的に指定され、すべての物体色は馬蹄形の閉領域内部にプロットされる^{*}。周囲の曲線は可視領域の単色光による軌跡である。たとえば、480, 520, 580, 650 (nm) の波長は異なった色相の青、緑、黄、赤の知覚を生じる。また無彩色はこの閉領域のほぼ中央に位置する。したがって、この中心点からの距離とともに色の彩度が増大する。

このように物体の色は三つの組 (x, y, Y) で表示されることになるが、この表色系を CIE の XYZ 表色系と呼ぶ。

色知覚の重要な性質は等色性である。すなわち、物体色の物理的な性質は分光反射率分布で定まるが、眼はそのようなスペクトル組成を見ているのではない。たとえ二つの色のスペクトル組成が異なっても、われわれは現実と同じ色と判断している^{**}。XYZ 表色系はこの等色性に関して、2色の座標値 (x_1, y_1, Y_1) と (x_2, y_2, Y_2) が一致すれば、たとえ分光反射率分布 $\rho_1(\lambda)$ と $\rho_2(\lambda)$ が異なっても、それらは同じ照明条件のもとで等色であることを意味している。

* この表色法はカラーディスプレイのような光源色の場合にも適用される。

** たとえば、色材を混合して灰色を作り出す場合を想定する。白と黒を混合しても、また緑と赤紫のような補色関係の色を混ぜても灰色が作れる。両者は同じ色に見えてもスペクトル組成は異なっている。

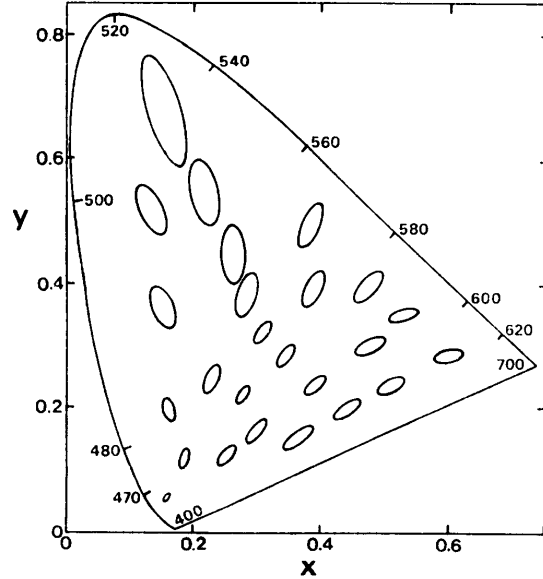


図4 色度図と MacAdam の楕円

Fig. 4 Chromaticity diagram and MacAdam's ellipses.

以上のような原理に基づいて色は計測される。まず対象物体の分光反射率 $\rho(\lambda)$ を分光測定する。標準の光源について $E(\lambda)$ 、標準の観測者について $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ が定められているので、(1a)~(1c)式から計算で三刺激値を求める。この精密な方法は分光測色法と呼ばれる。また一般に普及している色彩計は上の計算を光学的に実施している。

2.2 均等色空間による色知覚の表現

XYZ 表色系は、本研究で取り扱う色相、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。この事実を端的に表すために、図4に MacAdam による等色実験の結果を楕円で示した⁷⁾。25個の楕円のそれぞれは、中心の色と区別できなくて等色と判定された領域を表す(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が大きな色差として検出されるが、緑色領域ではその逆の傾向である。すなわち色度図上の距離は知覚的な色差に対応しない。

マンセル表色系では、 H (色相)、 V (明度)、 C (彩度) の各属性が知覚的に等ステップで分割したスケールで空間が定義されている。一般に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、計測量との対応がつけにくい空間である。しかしその必要性のため、三刺激値、 X, Y, Z の項で均等空間を作る方法がこれまでに数多く提案

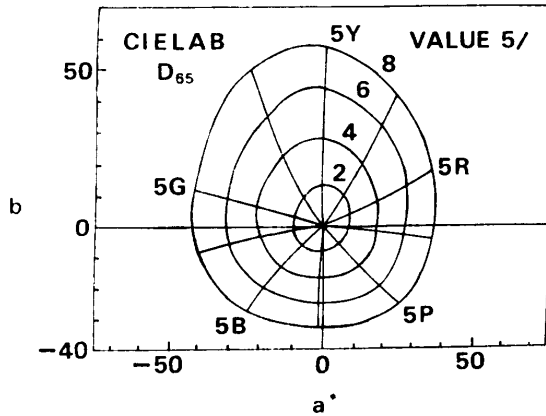


図5 $L^*a^*b^*$ 表色系の (a^*, b^*) 平面上に描いたマンセル系の一定色相と一定彩度の軌跡*

Fig. 5 Munsell loci of constant Hue and Chroma plotted in the (a^*, b^*) diagram of the $L^*a^*b^*$ color system*.

されてきた。

$L^*a^*b^*$ 表色系は CIE が均等色空間の標準化に向けて推奨した表色系である^{8)*}。これの出所は、マンセル空間と厳密に対応がつくように設計された Adams の均等色空間で、それを簡略化したものであるといわれている⁹⁾。本論文ではこの $L^*a^*b^*$ 表色系の構造を手本にした。 $L^*a^*b^*$ 空間は次の3量 L^*, a^*, b^* の直交座標系で定義される。

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad (4a)$$

$$a^* = 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \quad (4b)$$

$$b^* = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}]. \quad (4c)$$

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おり、このような変換ルールはしばしば1/3乗則と呼ばれる。これが均等色空間の一つの理想とされるマンセル空間をどの程度近似するかを確認しておく必要がある。まず、 L^* はマンセルの明度 V をほぼ10倍したもので、メトリック明度と呼ばれる。色度については図5に例示する(文献6) p.102 参照)。2次元 (a^*, b^*) 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。知覚的に均等とは、マンセル座標系上の色をこの空間にプロットしたとき、それらが均等に配置されることにはほかならない。図5では、これらがほぼ再現されており、 (a^*, b^*) の座標系がマ

* この色空間は正式には CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) 空間と呼ばれ、しばしば CIELAB と略称される。

ンセルの H と C からなる色度平面 $(H, C)^*$ を良好に近似していることがわかる。

それゆえ、 $L^*a^*b^*$ 表色系ではマンセルの H と C に対応する量として、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。

$$H_{ab}^* = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (5a)$$

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (5b)$$

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

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

ただし、 $\Delta L^* = L_2^* - L_1^*$, $\Delta a^* = a_2^* - a_1^*$, $\Delta b^* = b_2^* - b_1^*$ である。

3. 写像法の原理

3.1 実効反射率の定義

これまでの画像計測装置では三刺激値を測定することができず、計測量はたんに光強度や光学的濃度である場合が多い。本研究で使用したドラムスキャナの測色系は、試料からの反射光をミラーやフィルタで色分解して、B/W, R, G, B の4成分について光学的濃度を測定するものである。光源にはハロゲンランプを用い、ホトマルチプライヤで色分解した各成分光を検出している。

さて、標準測色法における三刺激値に代わりうる計測量として、本論文では実効反射率という物理量を定義する。これは物体に入射した光の強度(光束)と反射した光の比を、各色成分について求めたもので定義する。具体的には B/W, R, G, B について次式で記述する。

$$\rho_{B/W} = \frac{\int E(\lambda) \rho(\lambda) \phi_{B/W}(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) \phi_{B/W}(\lambda) d\lambda} \quad (7a)$$

$$\rho_R = \frac{\int E(\lambda) \rho(\lambda) \phi_R(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) \phi_R(\lambda) d\lambda} \quad (7b)$$

$$\rho_G = \frac{\int E(\lambda) \rho(\lambda) \phi_G(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) \phi_G(\lambda) d\lambda} \quad (7c)$$

* マンセルの (H, C) 平面は正式にはクロマチックネス平面と呼ぶべきであるが、色度平面と略称する。

$$\rho_B = \frac{\int E(\lambda)\rho(\lambda)\varphi_B(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)\varphi_B(\lambda)d\lambda} \quad (7d)$$

ここで、 $E(\lambda)$ と $\rho(\lambda)$ はそれぞれ光源の分光エネルギー分布と試料の分光反射率である。 $\varphi_{B/W}(\lambda)$, $\varphi_R(\lambda)$, $\varphi_G(\lambda)$, $\varphi_B(\lambda)$ は各色成分に関する計測系の応答関数である。この関数は視覚系は等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ に対応するものとして考えることができる。応答関数は、具体的には、ドラムスキャナの色分解系の分光透過率と検出器の感度特性を結合した総合分光感度分布として算出される。

図6に本研究で設定した応答関数の姿を示す。

反射率という言葉は、実効反射率のほかにも、分光反射率 $\rho(\lambda)$ や視感反射率 Y などに使用されているが、物理的意味は異なる。また、実効反射率と(1a)~(1c)式で定義される三刺激値との相違は、反射光の基準化の仕方であることに注意すべきである。実効反射率は各色成分ごとに独立した入射光と反射光の比率を表す。他方、三刺激値の定義は、あくまでも人間の眼で見えるということが基本であるから、入射光の明るさ情報を表す K で各反射光を正規化している。

しかしながら、知覚属性を求めるうえで、三刺激値よりも実効反射率を用いれば、後述するように、より直接的な関係を導くことができる。また計測上の利点がある。現実には種々の画像計測系が存在するが、光の絶対測定はできなくて、標準試料を用いるなど何らかの基準化操作が必要とされる。このとき実効反射率の計測は容易である。ドラムスキャナの場合は実測される濃度 D の指数変換 10^{-D} からただちに求まる。実効反射率はこのように、試料の表面色に関する最も重要な情報となりうる。

3.2 実効反射率と知覚属性の対応

CIE の $L^*a^*b^*$ 表色系は三刺激値を用いて組み立てられているが、その色空間はマンセル空間を近似する均等色空間であった。ここでは、 $L^*a^*b^*$ 表色系の構造に洞察を加え、実効反射率とマンセルの知覚属性との間に関係を導く。本研究で4種類の色信号成分を使用する理由は、とくに明度の推定精度を高めるためである。そのため基本的な対応関係は $\rho_{B/W}$ と明度、および ρ_R , ρ_G , ρ_B と色度の二つについて分類される。

なお信頼性を検証するためにマンセル標準色票を用いて実測を行うが、以前の結果と対比させるため、使

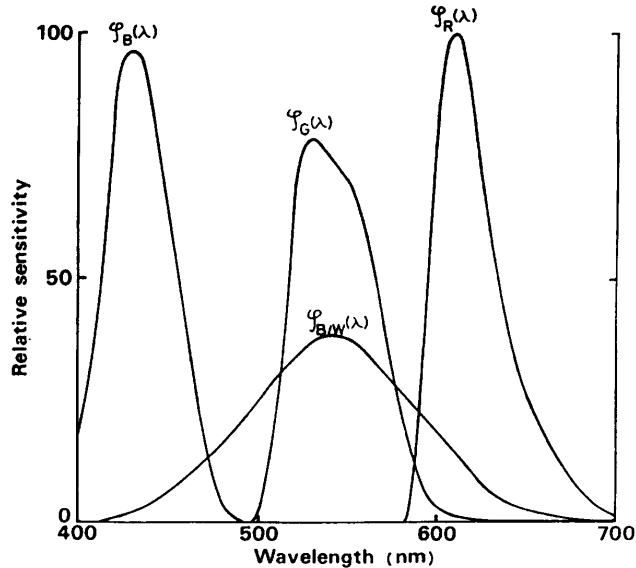


図6 計測系の応答関数

Fig. 6 Response functions of the measuring system.

用する色見本ならびにドラムスキャナの測定条件はすべて文献5)と同一にした。

3.2.1 明 度

反射光のスペクトル組成から明るさの情報のみを正しく抽出するためには、応答関数 $\varphi_{B/W}(\lambda)$ を比視感度曲線(図3の $\bar{y}(\lambda)$)に適合させればよい。このとき実効反射率 $\rho_{B/W}$ は刺激値 Y と等価量となる。実際 $\rho_{B/W}$ と Y の定義から、 $Y/Y_0 = \rho_{B/W}$ が成立することに注意する。 $L^*a^*b^*$ 表色系でマンセルの明度 V に対応するのは L^* であった。これの定義式(4a)から、明度は実効反射率の3乗根に比例するという関係が導出される。すなわち、

$$\text{明度} \leftrightarrow \rho_{B/W}^{1/3}$$

この関係の妥当性を図7に例示する。無彩色Nおよび5R, 3G, 5Bの色相をもつ各色票について、計測濃度から得た $\rho_{B/W}$ と正しい明度 V の関係をプロットした。直線性はかなり優れていることがわかる。

3.2.2 色 度

$L^*a^*b^*$ 系において座標系 (a^*, b^*) はマンセル系の色度平面 (H, C) を近似した。これは三刺激値 X, Y, Z の1/3乗則という非線形変換の操作に大きく依存している。しかし、また(4b)と(4c)式に注意すれば、 X, Y, Z の値がまずそれら自身で正規化されてい

* すなわち、色票は CHROMATON 707 で、N 9.5 の色票が $\rho(\lambda)=1$ の基準白紙である。色分解系も同一のものを使用したの、図6の関数も共通している。測光のアーチファクトは 0.5×0.5 (mm²) で 10×10 平方領域の平均濃度を求めている。これを指数変換して実効反射率を得ている。

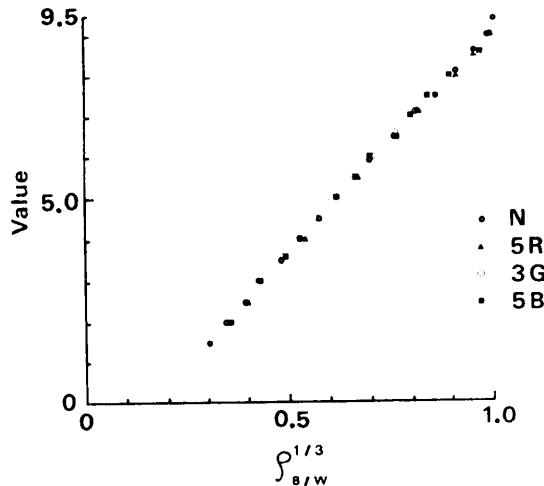


図7 明度と実効反射率 $\rho_{B/W}$ の関係
Fig. 7 Relation between the value and the effective reflectance $\rho_{B/W}$.

ることに注目される。いま、これらの比 $X/X_0, Y/Y_0, Z/Z_0$ をパラメータ ρ_x, ρ_y, ρ_z と記して、定義に従って書き改めれば以下ようになる。

$$\rho_x \equiv X/X_0$$

$$\rho_x \equiv \frac{\int E(\lambda)\rho(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda} \quad (8a)$$

$$\rho_y \equiv Y/Y_0$$

$$\rho_y \equiv \frac{\int E(\lambda)\rho(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda} \quad (8b)$$

$$\rho_z \equiv Z/Z_0$$

$$\rho_z \equiv \frac{\int E(\lambda)\rho(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda} \quad (8c)$$

(8a)~(8c)式を実効反射率の定義式(7b)~(7d)式と比較しよう。上式の ρ_x, ρ_y, ρ_z は実効反射率にほかならない。厳密に言えば、等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ と応答関数 $\varphi_R(\lambda), \varphi_G(\lambda), \varphi_B(\lambda)$ の形は、図3と図6のように一致しない。しかし等色関数は、やはり仮想的な3原色に対する応答を表現しているので、両関数は対応するものである。パラメータ ρ_x, ρ_y, ρ_z には色彩学分野で特別な名称が与えられていないが、これらは実効反射率 ρ_R, ρ_G, ρ_B と等価な物理量であることがわかる。

以上の考察より、1/3乗則の変換ルールを実測可能

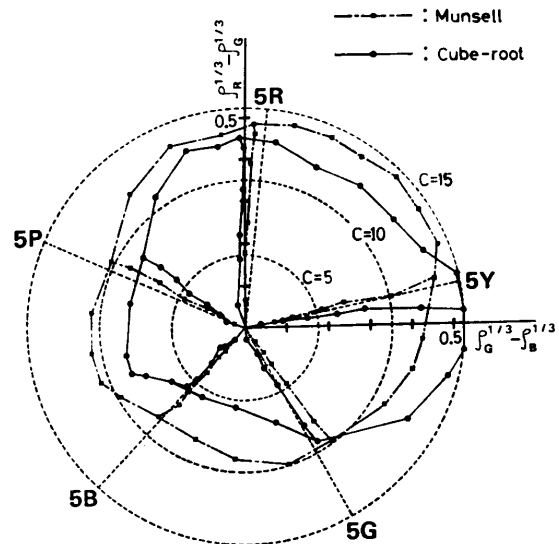


図8 マンセル色度平面と実効反射率の1/3乗変換で定義した観測平面との比較
Fig. 8 Comparison between the Munsell chromaticity plane and the observation plane defined by a cube-root transformation of the effective reflectances.

な実効反射率に対してそのまま適用することが可能となる。すなわち、実効反射率の3乗根の差で定まる2次元直交座標系が色度平面を近似することになり、次のような対応関係が得られる。

$$\text{色度} \leftrightarrow (\rho_G^{1/3} - \rho_B^{1/3}, \rho_R^{1/3} - \rho_G^{1/3})$$

なお、二つのスケールを整合させる係数はとくに必要としない。

次にこの関係の妥当性を例示する。図8はマンセルの色度平面と、ここで考案した観測平面を重畳させたものである。前者については (H, C) の極座標を破線で表し、後者については $(\rho_G^{1/3} - \rho_B^{1/3}, \rho_R^{1/3} - \rho_G^{1/3})$ の直交座標を実線で表している。まず、 (H, C) 系上の正方形のドットは色見本の本来の色度座標点を示している。次に、これらの測定結果を丸いドットで観測座標上に描いた。2種類の軌跡を重ねてある。

良好な適合関係が得られている。実効反射率に基づく観測平面では、時計の回転方向に色相 H の配列 R, Y, G, B, P が対応している。また原点からの距離が彩度 C に対応し、距離とともに C の値が増す。詳細に比較すれば、一定色相の直線は精度よく再現されているが、一定彩度の円については偏りがみられる。5Y 付近で膨張し、5B~5P では縮小している。図5では (a^*, b^*) 平面とマンセル色度が比較されたが(色相の対応は反時計)、これらと同様な性質を有する。この

ように観測平面の表現の忠実性が認められる。

4. 写像の計算と性能

4.1 写像計算

前章では、実効反射率 $\rho_{B/W}, \rho_R, \rho_G, \rho_B$ を定義し、これらによる3次元座標系 ($\rho_B^{1/3}/w, \rho_G^{1/3} - \rho_B^{1/3}, \rho_R^{1/3} - \rho_G^{1/3}$) を用いれば均等色空間を近似的に表現できることがわかった。ここでは、任意の色見本について3属性 H, V, C を推定するために、計測系からマンセル色空間への写像を決定する。

まず写像を数学的にモデル化する。計測系からの観測値を、等価な量として実効反射率の3乗根 $\rho_B^{1/3}/w, \rho_R^{1/3}, \rho_G^{1/3}, \rho_B^{1/3}$ とみなす。そこで5次元ベクトル

$$s = [1, \rho_B^{1/3}/w, \rho_R^{1/3}, \rho_G^{1/3}, \rho_B^{1/3}]^T \quad (9)$$

で色信号の観測空間 S を記述する。記号 T は行列の転置を示す。第1要素の定数は、主として明度 V を推定する際のバイアス項として追加した。このため空間 S の自由度は4で、値域は実効反射率の定義より5次元空間 R^5 の $\{1, [0, 1], [0, 1], [0, 1], [0, 1]\}$ に限定される。

他方、マンセル空間は (H, V, C) の円筒座標系である。 H の基本色相は R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, RP であるが、各基本色相を 1R, 2R, ..., 10R のように知覚的に10等分して、通常100色相で表示される。ここでは数値計算の便宜上、色相を $0 \leq H < 100$ の実数で表現している。5Rが基準で、 $H=0, 10, 20, \dots$ は順に 5R, 5YR, 5Y, ... を意味する。 V は明度の定義から $0 \leq V \leq 10$ の実数で示す。また $C (\geq 0)$ は色味の強さを表す属性で、上限は一般に確定しないが、本研究では標準色票の存在する $C < 15$ の領域で解析を行っている。このような色知覚の空間 P を3次元ベクトル

$$p = \left[C \sin\left(\frac{2\pi}{100} H\right), C \cos\left(\frac{2\pi}{100} H\right), V \right]^T \quad (10)$$

で記述する。

さて、 S と P の両空間の間で、 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写像 $f: S \rightarrow P$ を、連立方程式

$$p = F s \quad (11)$$

で記述する。 F は写像を定める 3×5 の変換行列である。この行列は多数の標準色票を実測し、それらの最小2乗解として決定される(文献5) § 5.2 参照)。この解を \hat{F} とすれば、任意の色見本について表色値は $\hat{p} = \hat{F} s$ の形で推定できることになる。さらに $\hat{p} (\equiv$

$[\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3]^T$) を円筒座標系へ逆変換すれば、

$$\hat{H} = \frac{100}{2\pi} \tan^{-1}(\hat{p}_1/\hat{p}_2) \quad (12a)$$

$$\hat{V} = \hat{p}_3 \quad (12b)$$

$$\hat{C} = (\hat{p}_1^2 + \hat{p}_2^2)^{1/2} \quad (12c)$$

で3属性の推定値が得られる。また \hat{H} を色相記号になおして、 $\hat{H}\hat{V}\hat{C}$ の形式で表記すれば、標準的なマンセル記号となる。

4.2 実験結果および性能

まず、約350色のマンセル標準色票を計測し、これらに基づいて変換行列を次のように得た。

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} 1.00 & -16.86 & 1.95 & 41.08 & -27.60 \\ -0.18 & -8.61 & 34.00 & -20.88 & -4.11 \\ -1.69 & 11.46 & -0.57 & 0.26 & -0.38 \end{bmatrix} \quad (13)$$

次に、テスト用の色見本として別の約300色の色票を使用した。これらの観測値を \hat{F} で色空間に写像し、推定した表色値と元のマンセル表色値を比較することにより精度を調べた。図9にこの一部を色度平面上で示す。図中の各ベクトルが一つの色見本に対応し、始点と終点はそれぞれ正しい表色値 (H, C) と推定値 (\hat{H}, \hat{C}) を示す。ベクトルの長さが推定誤差である。この結果は本写像法の精度が十分高いことを示している。細部についてみれば、色相 5Y および 5B~5P の付近に誤差が見られる。これは図8について指摘したことに一致する。すなわち表色値が一定の方向に変動する傾向は、ランダムな雑音によるものではなく、本写像法に固有の特性と考えるべきである。

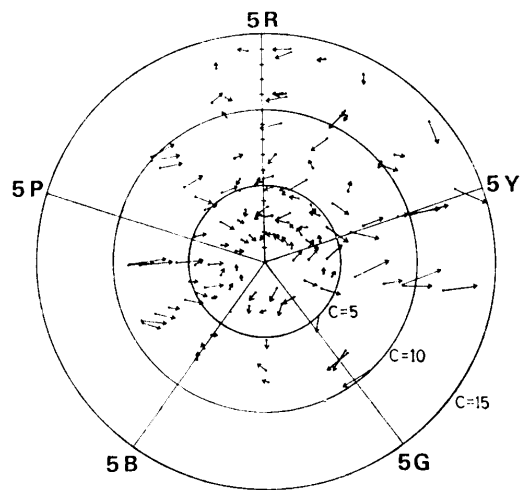


図9 表色結果
Fig. 9 Color-specification results.

表 1 実験における表色の性能

Table 1 Performance of the color specification in an experiment.

Chroma	$\Delta\hat{H}$	$\Delta\hat{V}$	$\Delta\hat{C}$	$\Delta\hat{E}$
0.0—1.0	—	0.075	0.26	0.51
1.0—2.0	4.03	0.071	0.21	0.56
2.0—4.0	2.03	0.068	0.30	0.59
4.0—6.0	1.42	0.063	0.52	0.81
6.0—10.0	1.38	0.063	0.88	1.23
10.0—	1.58	0.068	0.47	0.81
Value	$\Delta\hat{H} (C \geq 1)$	$\Delta\hat{V}$	$\Delta\hat{C}$	$\Delta\hat{E}$
0.0—5.0	1.67	0.069	0.45	0.79
5.0—10.0	2.45	0.066	0.43	0.77
Average	$\Delta\hat{H} (C \geq 1)$	$\Delta\hat{V}$	$\Delta\hat{C}$	$\Delta\hat{E}$
	2.16	0.068	0.44	0.78

次に色差式で実験結果を定量的に評価する。H, V, Cに関する色差をそれぞれ

$$\Delta\hat{H} = |H - \hat{H}|, \Delta\hat{V} = |V - \hat{V}|, \Delta\hat{C} = |C - \hat{C}| \quad (14)$$

とおき、総合した色差として Godlove の色差式

$$\Delta\hat{E} = \left\{ 2CC \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi}{100} \Delta\hat{H} \right) \right) + (\Delta\hat{C})^2 + (4\Delta\hat{V})^2 \right\}^{1/2} \quad (15)$$

を使用する。表1にこれらの尺度に基づいた表色の性能を示す。各属性に関する誤差および合成した $\Delta\hat{E}$ が、彩度と明度の異なるいくつかの領域で平均値として与えられている。本実験では総合的评价として、 $\Delta\hat{E} = 0.78$ が得られた。文献5)の簡便法では同一実験において、 $\Delta\hat{E} = 1.28$ であったので、性能は大きく向上している。また、いくつかの評価基準を用いて調査したが、表1からも結論づけられるように、3属性の中で明度Vの精度が最も優れており、つづいて彩度C、色相Hの順といえる。

5. 適用

開発した手法をカラー写真印画紙の表面色の推定に適用する。写真印画紙を取り上げた動機は、カラー画像の材料として現実に多用されていること、およびこれまで使用してきた色票と色材（すなわち発色の仕方）が異なるからである。

一般に色材には顔料（塗料）系のもので染料系のものであるといわれている。色票は前者に属し、多くの

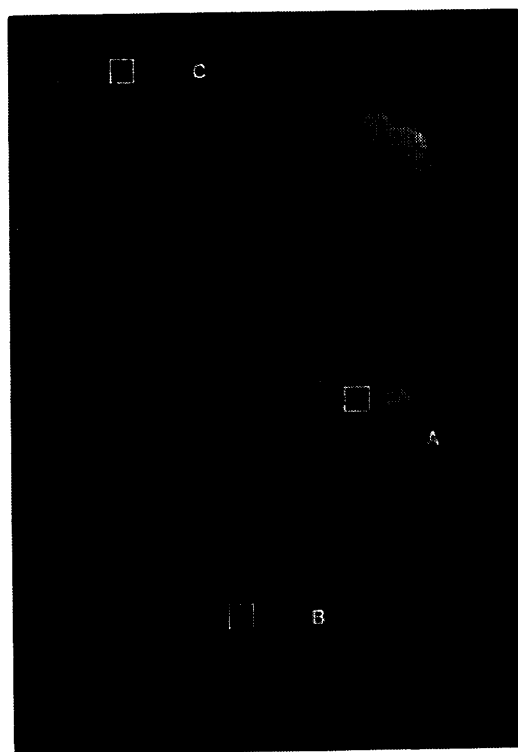


図 10 花の写真
Fig. 10 A picture of a flower.

塗料を調色することにより製作されている。マンセル標準色票などは、色数が豊富でしかも品質管理は厳重である。表面色の物理的特性は分光反射率というスペクトル分布で一義的に定まり、しかも同系の材料で作った色見本はスペクトル分布の類似した特徴をもつ。たとえば、多数のマンセル色票の分光反射率を計測して、主成分分析すれば、多くの塗料から作られているにもかかわらず、3種類程度のスペクトル分布曲線の組合せで表現できるという研究結果がある¹⁰⁾。このことから前章の実験結果は、顔料系の材料で作られた色見本に対して、そのまま通用するものと期待できる。

写真印画紙は染料系の色材によるものと考えられ、その発色の仕方については成書がある¹¹⁾。ここでは、開発した手法をカラー印画紙に直接適用したが、正確な表色値と対比させるために、2章で述べた分光測色法による結果も述べる。

さて、試料は図10の花の写真である。計測箇所は花卉、葉、背景の3個所で、それぞれA, B, Cで指示された 5×5 (mm²) 正方領域（白枠内）である。分光測色の結果をまず示す。これには電総研大阪支所の大形積分球付の分光光度計（島津製作所製 UV-3）が

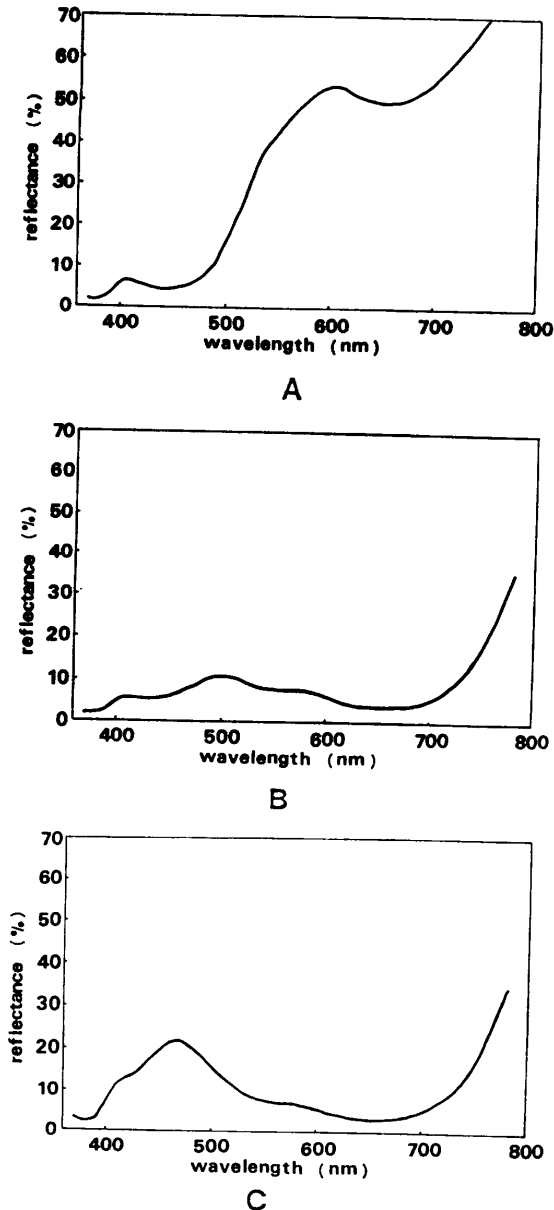


図 11 A, B, C の分光反射率
Fig. 11 Spectral reflectances of A, B, and C.

使用された。照明と受光の条件は、試料の表面を垂直な方向から照射し、反射した拡散光をすべて集めて分光反射率を測定する方式である。光源は CIE の標準の光“C”（昼光を代表する）で、また標準白色面としては硫酸バリウム (BaSO_4) が使用された。各部の分光反射率分布 $\rho(\lambda)$ を図 11 に示す。図中で、色覚に意味をもつのはせいぜい波長領域 400~700 (nm) の分布曲線のみである。

等色関数を用いた色度計算より色度と視感反射率の

(x, y, Y) の値がそれぞれについて

A : (0.456, 0.463, 40.5%)

B : (0.280, 0.351, 7.6%)

C : (0.211, 0.219, 8.3%)

として得られる。これらはまた図 12 のように色度図上にプロットされる。B (葉の一部) の色度点は閉領域の中心点に近く存在するので、彩度の低い色であることを示している。表色値 (x, y, Y) とマンセルの 3 属性 HV/C の関係は、標準の光“C”についてのみ、数表で与えられている。日本工業規格 (JIS Z 8721) の関係表¹²⁾より次のマンセル表色値に変換される。

A : 3 Y 7/10

B : 7.5 G 3/3

C : 2.5 PB 3.5/6

一方、われわれの測色法は大変直接的で、ドラムスキャナによる観測値を行列変換するだけである。ドラムスキャナと分光光度計の分解能はまったく異なる。そこで、スキャナのアパーチャサイズを最大の $1(\text{mm}^2)$ とし、測定個所を 5×5 の格子領域に分割して、それらの平均値を採用した。写像の変換行列は前章と同一のものを使用し、次の結果を得た。

A : 4.3 Y 6.8/9.7

B : 5.3 BG 3.0/1.9

C : 2.2 PB 3.3/6.1

上述の分光測色法による結果との色差を求めたが⁸⁾、色票を用いた前章の実験結果と大きな差異はみあたらない。A, B, C は黄、緑、青に対応するが、これらのなかでは緑の葉の部分の推定誤差が大きい。ここで図 11 の分光反射率分布を観察すれば、B の分布は他と比べて反射率が全体的に小さく、また波長に対する変化率も小さいことがわかる。すなわち分布曲線の特徴が少なく、図 6 の応答関数でそのスペクトル特性をとらえることがむずかしいことを意味している。一般に低明度、低彩度の色について同じ傾向があるといえる。

6. おわりに

本論文では、コンピュータ・カラー・ビジョンのための写像法を、色彩学の測色論に基づいて展開した。基本方針は、汎用のカラー画像入力装置を用いて色紙

* なお、マンセル標準色票は、一般に、標準の光“C”の照明下で値が付けられている。そのため、これに基づいて定めた行列で変換を行えば、光源がたとえハロゲンランプであっても、推定値は C 光、すなわち、昼光の照明のもとでのマンセル表色値ということになる。したがって分光測色法との比較が可能となる。

や写真印画紙などの表面色を観測し、その色知覚をマンセル表色系の色相、明度、彩度で推定することであった。

まず、測色の標準的な方法論を要約し、均等色空間による表色の重要性を指摘した。マンセル表色系を近似する測色用の均等色空間として CIE の $L^*a^*b^*$ 表色系を取り上げ、その構造を検討するとともに現実の画像計測系の機能を調べた。この理論的解析により、次の2点が明らかになった。

- (1) 実効反射率を表面色の重要な計測量として定義できる。
- (2) 1/3 乗則という非線形変換は色知覚の3属性を推測するために有用である。

これらの結果に基づいて、計測系からマンセル表色系への写像を大きさ 3×5 の行列で実現することができた。計測と写像のシステムの性能を色票を用いた実験で検証し、平均的な表色誤差は Godlove の色差式で約 0.78 という優れた結果を得た。

具体的な応用として、カラー印画紙の表面色を推定した。本論文で開発した方法はカラー画像計測を目的としたものであり、測色の処理の高速性が大きな特色である。その推定結果と厳密な分光測色法による結果を比較することにより、実用面においても十分な性能を有することがわかった。

今後に残された問題は、カラー画像計測系の最適な応答関数を決定することである。応答関数の形に依存して抽出されるスペクトル情報が異なり、写像の性能に大きな影響をもたらすことはいままでの本論で使用した応答関数は経験的に定めたものである。しかし、この形は唯一のものではなくて、同程度の性能を有する応答関数は図6のほかにもいくつか存在することがわかっている¹³⁾。計測系の最適化は重要な問題である。

謝辞 色彩学のご教示をいただいた本学納谷嘉信教授、カラープリントの分光測色を実施していただいた電子技術総合研究所大阪支所南条 基研究室長と測色グループの諸氏、とくに有益な討論をしていただいた高浜幸太郎主任研究官に深謝いたします。

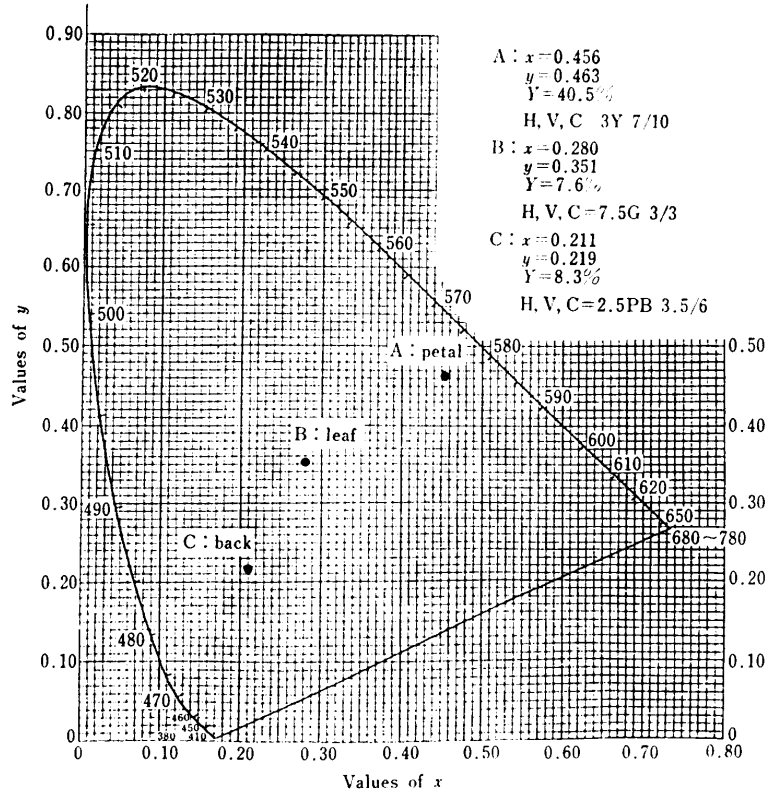


図 12 分光測色法により決定された表色値
Fig. 12 Color specifications determined by spectrophotometry.

参 考 文 献

- 1) 白井良明: コンピュータビジョン, 昭晃堂, 東京 (1980).
- 2) Ballard, D.H. and Brown C.M.: *Computer Vision*, Prentice-Hall, New Jersey (1982).
- 3) Brown, C.M.: *Color Vision and Computer Vision*, Computer Science Department, University of Rochester, New York (1982).
- 4) Wyszecki, G. and Stiles, W.S.: *Color Science*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York (1982).
- 5) 富永昌治: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 655-664 (1984).
- 6) 納谷嘉信: 産業色彩学, 朝倉書店, 東京 (1980).
- 7) MacAdam, D.L.: *Color Measurement*, Springer-Verlag, New York (1981).
- 8) CIE: Recommendations on Uniform Color Spaces, Color-Difference Equations, and Psychometric Color Terms, Supplement No. 2 of CIE Publ. No. 15, *Colorimetry* (E-1.3.1) 1971, Bureau Central de la CIE, Paris (1978).
- 9) 高浜幸太郎, 側垣博明, 納谷嘉信: CIE LUV と CIE LAB 均等色空間に関する最近の話題,

- 照明学会誌, Vol. 64, No. 5, pp. 223-229 (1980).
- 10) Cohen, J.: Dependency of the Spectral Reflectance Curves of the Munsell Color Chips, *Psychon. Sci.*, Vol. 1, No. 12, pp. 369-370 (1964).
- 11) James, T.H. (ed.): *The Theory of the Photographic Process*, 4th ed., Macmillan, New York (1977).
- 12) 日本色彩学会 (編): 色彩科学ハンドブック, p. 1350, 東京大学出版会, 東京 (1980).
- 13) 富永昌治: コンピュータ・カラー・ビジョンのための写像法, 電子通信学会技術研究報告, PRL 83-87, pp. 91-102 (Mar. 1984).
- (昭和59年6月27日受付)
(昭和59年9月20日採録)