技術報文

(平成2年1月22日受理)

画像処理装置を利用した着色物の二次元分光測色

大阪市立工業研究所 田川由利香・上田 充夫・平嶋 恒亮
ミノルタカメラ高槻研究所 政木 康生*TWO DIMENSIONAL SPECTRAL COLOR ANALYSIS OF COLORED MATERIALS
UTILIZING COMPUTER IMAGE ANALYZING SYSTEMBy Yurika Tagawa^{*1}, Mitsuo Ueda^{*1}, Yasuo Masaki^{*2}, and Tsuneaki Hirashima^{*1}^{*1} Osaka Municipal Technical Research Institute, Joto-Ku, Osaka, 536 Japan^{*2} Minolta Camera Co., Ltd., Takatsuki Lab., Sakuramachi, Takatsuki, 569 Japan

ABSTRACT: The methods to analyze the color of dyed or printed materials utilizing computer image analyzing systems were studied. Spectral reflectance curves and tristimulus values of the samples could be obtained as two dimensional data from the image of the sample. The reflection image of the sample was filtered and spectrally divided with 20 types of interference monochromatic glass filters (20 nm intervals, 400 – 780 nm) to 20 divisions of monochromatic images. Each monochromatic image was recorded by video camera, digitalized, and stored on the computer memories. From the images on the memories, spectral reflectance curve and CIE-XYZ tristimulus values at any point of the sample could be obtained with high accuracy. The technique could be applied to the quantitative analysis of the colorant absorbed on a solid substrate. The image of the sample formed by monochromatic reflection was converted to that formed by K/S values by computer calculation using the Kubelka-Munk equation. Since an intensity at any point in the K/S image could be related to the density of colorant at the corresponding point of the sample, the integration of the intensities of K/S image over entire surface represents the total amount of colorant on the sample. Some examples of the method were demonstrated.

(Received January 22, 1990)

1. 緒 言

着色物の色彩管理あるいは色評価は現在でも多くの場合肉眼に頼っている。しかしながら、肉眼による色評価はサンプルの大きさ、光源光量、背景色、サンプル間距離などによる色覚の変動を避けることができず、往々にして大きな評価誤差を導くことがある。また、判定環境を極めて厳密に規定しなければならない上に、判定者には十分な熟練が要求される。

このような現状から、近年、着色物の色評価を機器に

よって行なおうとする傾向が顕著になり、コンピュータカラーマッチングや染料溶液自動調液システムの開発など機器測色による色材管理方法が積極的に検討され、導入されている[1-4]。また、寺主[5]は実際に機器計測によって色彩管理を行う上で非常に重要な問題として指摘される、人間の色覚と機器による理論的な測色値との差異について詳細な研究を行い、これらの差異を補完した新しい独自の表色系としてHC*B*表色系を提案し、機器による色彩管理の実用化への適応を広げた。

さて、このような機器測色の普及に伴い、多種多様な実際の着色物に対応できる測色機器が望まれるようになった。しかし、従来の機器では比較的広い試料面積を必要とし、色相や色濃度が勾配をもって変化している試料などについては適用が困難である。また、多種にわたる着色物の中で測色機器のメカニズム上利用できない場合

* 現在の所属：(株)画像工学研究所

〒639-02 奈良県北葛城郡香芝町

^{*2} Present address: Imaging Technology Laboratory Co., Ltd., Kashiba-cho, Kitakatsuragi-gun, Nara, 639-02 Japan

も数多く見られる。したがって、これらの諸問題を解決し、かつ最近のニーズに応える必要性から、よりミクロな領域で、しかも二次元的な色彩変化にも対応できる、より適用範囲の広い測色機器の開発が望まれる。

そこで、我々はコンピュータ画像処理装置を応用して測色を行なう試みを行ってきた。画像処理装置での色彩計測が可能となれば、色彩変化を二次元的に解析できるので、複数の色彩が複雑に入り組んだ染色物や、色が微妙に変化するサンプルなど、これまで既存の色彩計測機器では不可能であったサンプルについても機器による測色の適用範囲が著しく拡大すると考えられる。

すでに前報[6]では、ハンター型三刺激値直読式色彩計の基本原理を応用した画像測色方法について検討した。すなわち画像処理装置のモノクロビデオカメラの前にCIE-XYZ三刺激値曲線に対応した三枚のガラスフィルターを順次取り付けて、各フィルターの分光感度曲線に適合した分光画像をメモリーに取り込み、その各画像の濃度値(光量値)から試料の三刺激値XYZをその位置情報とともに一括して得る方法を検討した。

本報では、さらに精度が高く、より応用範囲が広い分光反射率測定式画像測色システムについて述べる。これは従来の反射分光光度計の基本原理を応用したもので、モノクロビデオカメラの前に干渉フィルターを装着し、可視光領域(400-780nm)について、各波長ごとに分光された反射光画像を画像処理装置のメモリーに記憶させる。これらの画像が持つ濃度値情報を総合して、試料画像の分光反射スペクトルをその位置情報とともに得て、さらには、三刺激値XYZを得ようとするものである。この方法では、非接触で、取り込んだ試料の任意の位置の分光反射スペクトルを得ることができる。

さらに、本システムの応用例として、画像測色システムを用いた固体基質上に吸着した色素の定量分析をおこなった。この定量方法を利用すると、サンプルをビデオカメラに取り込むだけで色素量が求められるので、従来のような色素の溶媒抽出の必要は無く、複数の色素が同一基質上に混在するような場合でも目的の色素だけを画像処理によって任意に取り出し色素定量ができる。薄層クロマトグラフィ法による色素の定量にも有効に利用できる。

このように、本システムは測色以外にも応用範囲が広く、極めて興味深い方法である。

2. 実 験

2.1 画像処理装置

使用した画像処理装置は(株)ピラス製のPIAS-II Eおよびミノルタカメラ(株)製のRAPID MODEL 3221であ

Fig. 1. Schematic diagram of the image analyzing system.

る。PIAS-II Eはモノクロ画像(512×512画素)4画面のオンメモリー記憶が可能で画像濃度は64階調である。一方、RAPID MODEL 3221は20画面(512×512画素)がオンメモリーで記憶でき、画像濃度は256階調に分解される。いずれの装置もCCDビデオカメラによって画像入力をおこない、取り込まれた画像はADコンバーターによってデジタル化された後、画像処理装置のメモリーに記憶され各種の処理がなされる。本システムの全体図を図1に示す。

2.2 照明および受光の条件

画像入力の際の照明および受光の条件はJIS Z 8722-1981(物体色の測定方法)条件aの45度照明、0度受光方式(45-0方式)を用いた。光源には色温度3150Kの500W タングステンフラッドランプ(東芝)を2灯使用した。

2.3 光学ガラスフィルター

分光した画像を得るための光学フィルターには日本真空光学(株)製の干渉フィルターを400-780nmの波長範囲で20nmごとに合計20枚使用した。これらはいずれも二次干渉を用いた金属干渉フィルターで、中心波長の最大透過率約40%、半値幅15nm以下、中心波長の許容範囲は±3nmである。これらを画像入力の際に一枚ずつモノクロビデオカメラのレンズの前に装着した。さらに、CCDビデオカメラは近赤外領域にまで高い受光感度をもっているため、近赤外光の透過を防ぐためにIRQ-80(東芝)シャープカットオフ・フィルター[7]を併せて使用した。

2.4 測定方法の概要

画像処理装置は反射光画像をビデオカメラで取り込んで、その画像を構成する画素の位置と反射光量値を画像メモリーに保存し、種々の処理を行なうものである。通常の場合、取り込まれる試料反射光は分光されていない

ので、メモリーに保存された画像には反射光の波長や色彩に関する正確な情報はない。(カラーカメラによって取り込まれた色彩は RGB 表色系で表現されるが、RGB 表色系特有の500nm 前後の負量を無視しているために、取り込まれた画像には正確な色彩情報はない。)そこで、本システムでは画像に正確な色彩情報を持たせるために画像入力の際、干渉フィルターによって画像をあらかじめ分光してから取り込む方法を採用した。まず、入力ビデオカメラの前に赤外カットフィルターと400nmの干渉フィルターを取り付け、試料の400nm 画像を取り込み画像メモリーあるいは外部記憶装置に保存した。次に干渉フィルターを420nm に交換し、同様に420nmの画像をとり込み、以下、順次780nm まで分光画像を取り込んだ。これらすべての画像について同じ位置にある画素に注目し、その画像濃度値を波長に対して走査すれば、その画像位置の見かけの可視領域の分光反射スペクトル(20nm 間隔)を得ることができる。そして、絶対反射率既知の白色標準の画像濃度値との比をとることによって、画像各位置の各波長における絶対分光反射率を求めることができる。(サンプル画像と白色標準の画像の比を取るによって、ビデオカメラに使用されている CCD の個々の感度特性の違いを校正することができる。)測定方法のシステムフローを図2に示した。

色彩のパラメータは試料の着目画素の分光反射率曲線から次に示す JIS Z 8701 の XYZ 表色系による表示方法[8]に従って三刺激値 XYZ を求めた。

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

Fig. 2. Flow diagram of two dimensional spectrophotometry.

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

ここで、 $S(\lambda)$:光源の分光分布

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$:XYZ 系に基づく等色関数

$R(\lambda)$:分光反射率分布

$$K = 100 / \left[\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \right]$$

λ :波長(nm)

3. 実験結果および考察

3.1 画像入力装置の入射光直線性

画像処理装置の画像入力部(CCD ビデオカメラおよび、A-D コンバータ)の入射光量と表示デジタル化濃度値との間にどの程度の直線関係があるかをしらべた。画像処理装置 PIAS-II E について、種々の明度のグレースケールを用い、その反射光画像のデジタル化光量値(画像中央70×70画素の平均値)をグレースケールの反射率(420-700nm の波長領域における値)に対してプロットしたのが図3である。この際、ビデオカメラの CCD はその性質上、入力光量がゼロでも素子自体の暗電流による出力電圧が認められるので、測定のとゼロ光量画像を別に取り込み、それらの差画像の濃度値をプロットしたものである。したがって、CCD 暗出力の画素間のばらつきは相殺されている。図3からわかるようにグレースケールの反射率と取り込まれた画像のデジタル化濃度値との間には良好な直線関係が認められる。このことは、画像入力装置は光の取り込み量に比例した正確なデジタル化濃度値を与えることを示すものである。同様の検討を画像周辺部でも行なった。画像周辺部においては、直線性は良かったものの、中心部に比べて若干の感

Fig. 3. Relation between reflectances of gray scales and their average digitalized intensities of the images.

度低下(直線の傾きの低下)が認められた。これは CCD 自体の性質に起因するものではなく、ビデオカメラレンズの周辺光量の低下および照明の周辺輝度の低下によるものと考えられる。したがって、画像全体について二次元的に濃度値を比較するような場合には、画像位置ごとの入力感度の補正を行わねばならない。幸い、本研究では反射率を求めるために標準白板の対照反射光量と測定試料からの反射光量との比をとることになるので、画像位置ごとの感度の違いなどが相殺される。なお、RAPID MODEL 3221 に関しても、入射光量とデジタル化光量値との間に同様の直線性が認められた。

3.2 分光反射率の測定

入力ビデオカメラの前に400–780nmの波長範囲で20nmごとの20枚の干渉フィルターを順次取り付け、取り込んだ20種の試料画像を画像メモリーに保存した。画像の同一画素(i, j)について各波長における画像濃度値 $I_{\lambda, i, j}(\lambda: 400-780\text{nm}, i, j: 0-511)$ と絶対反射率既知の白色標準の画像濃度値 $I_{0\lambda, i, j}(\lambda: 400-780\text{nm}, i, j: 0-511)$ との値から式1を用いて画像各位置の各波長における絶対分光反射率を求めることができる。

$$R_{\lambda, i, j} = k_{\lambda, i, j} \cdot (I_{\lambda, i, j}) / (I_{0\lambda, i, j}) \quad (1)$$

ここで $R_{\lambda, i, j}$, $k_{\lambda, i, j}$, $I_{\lambda, i, j}$ および $I_{0\lambda, i, j}$ はそれぞれ特定画素(i, j)、特定波長(λ)における絶対反射率、測定値を相対反射率から絶対反射率へ変換するための係数(白色標準の絶対反射率の逆数)、試料の画像濃度値および白色標準の画像濃度値である。

得られた試料の絶対反射率 $R_{\lambda, i, j}(\lambda: 400-780\text{nm}, i, j: 0-511)$ の値を、 λ に対してプロットすることによって、試料着目位置(i, j)の分光反射スペクトルを得ることができる。

着色物のモデルとして赤、黄、ピンク、青の4種類の着色ケント紙を試料に用い、以上のような方法によって

Fig. 4. Spectral reflectance curve of red-colored Kent paper determined by the image analyzing system: (○) average reflectance of 4×4 pixels in the center of the image; (●) average reflectance of 4×4 pixels in the right below of the image; (—) spectrophotometer.

Fig. 5. Spectral reflectance curve of yellow-colored Kent paper determined by the image analyzing system: (○) average reflectance of 4×4 pixels in the center of the image; (—) spectrophotometer.

Fig. 6. Spectral reflectance curve of pink-colored Kent paper determined by the image analyzing system: (○) average reflectance of 4×4 pixels in the center of the image; (—) spectrophotometer.

Fig. 7. Spectral reflectance curve of blue-colored Kent paper determined by the image analyzing system: (○) average reflectance of 4×4 pixels in the center of the image; (—) spectrophotometer.

その絶対分光反射スペクトルを測定した。ミノルタ製 RAPID 画像処理システムを用いて得たスペクトルを図4–7に示した。スペクトル図中の各プロットがそれぞれ本システムによって得た値で、実線は(株)島津製作所 MPS-2000 反射分光光度計カラーバックシステムによって得た絶対反射スペクトルである。図4の2種類のプロ

ットは画像中央部4×4画素、および画像右下部4×4画素における画像濃度の平均値から得た反射率値を比較のために示したものである。図4-7からわかるように、本画像測色システムで得た反射スペクトルは反射分光光度計によって得た値と極めて良い一致を示しており、このシステムが十分な精度の絶対反射スペクトルを与えることを示すものである。また、図4からわかるように、画像中央部での測定値と画像周辺部(右下)での値との比較でも良い一致が得られており、このシステムの画像全領域における高い測色精度を示唆するものである。

本システムによって得た反射率の各値からJIS Z 8722に規定された「物体色の測定方法」に準拠して、C光源2度視野における三刺激値X, Y, Zを求め、分光光度計により得た値とともに表1に示した。表1から明らかなように、本システムは十分な精度の測色値を与えることがわかる。

Table 1 Tristimulus Values of Colored Kent Papers Obtained by Image Spectrocolorimetry and Conventional Spectrocolorimetry. (Illuminant C, 2° Visual Field)

Color of Kent paper	Image spectrocolorimetry			Conventional spectrocolorimetry		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Blue	44.8	52.5	85.9	45.0	52.5	88.6
Yellow	71.1	74.9	19.9	73.8	79.8	21.8
Pink	59.0	44.4	63.1	59.9	44.8	63.9
Red	38.7	25.6	15.4	36.8	22.8	13.2

3.3 基質上の色素の画像定量

本システムが画像全体において正確なスペクトル反射率値を与えることを利用して、布や紙などの基質上に存在する色素の量を画像の濃度値から定量する試みを行なった。

基質上の色素の量はKubelka-Munk[9]によって理論的に導き出された式2に示すようなK/S値と比較的よい直線関係にあることが知られている。

$$K/S = (1-R)^2/2R \quad (2)$$

ここで、K/Sは色素の量を表すパラメータ、Rは着色表面の拡散反射率を示す。

したがって、本システムを用いた測定において、特定の画像位置*i, j*、波長*λ*における拡散反射率 $R_{\lambda, i, j}$ を知れば式3を用いて、反射光によって描かれた通常の画像をK/S値を画像濃度値とする $(K/S)_{\lambda, i, j}$ で描かれた画像へと、システム内で演算変換することができる。

$$(K/S)_{\lambda, i, j} = (1-R_{\lambda, i, j})^2/2R_{\lambda, i, j} \quad (3)$$

そして、得られた画像の各位置の濃度値は、それぞれ試料上の色素濃度に対応することになるので、各画像位置の画像濃度を取り出せば、その位置の色素濃度のK/S値を得ることができる。

平面の基質上に不均一に色素が存在する場合、従来の機器では反射光から間接的に色素の濃度に関するパラメータを得ることができなかったが、本方法を用いれば、Kubelka-Munk関数式2が成立する濃度範囲においては容易に反射光画像から色素濃度に関する情報を得ることができる。そして、一定の画像領域においてK/S値画像を積分することによって、その領域内の色素総量 $\Sigma K/S$ を定量することが可能となる。

そこで、色素濃度の定量の精度を検討するために、基質上に種々の濃度の色素水溶液を種々のサイズにスポットし、PIAS-II Eを用いて、それらのK/S画像から色素濃度の定量を試みた。すなわち、色素の最大吸収波長と同じ波長の分光フィルターを装着したモノクロビデオカメラで、色素スポットの反射光画像を取り込み、式1にしたがって絶対反射率画像に変換した後、式3によってK/S画像に変換した。さらに、色素の無い基質についても同様にK/S画像を得、サンプル画像から画像間の引算によって基質のみのK/S値を差し引いたのち、画像全体について積分することによって、スポットの総色素量のパラメータ $\Sigma K/S$ を得た。

図8は精製したC. I. Acid Orange 7を用いて、ペーパークロマト用ろ紙上に種々の水溶液濃度で種々のサイズのスポットをつくり、その画像の $\Sigma K/S$ をスポットした色素量に対してプロットしたものである。図8からわか

Fig. 8. Relation between amount of C. I. Acid Orange 7 on filter paper and integrated K/S value from K/S image. Concentrations of dye stock solutions to prepare the dye spots were: (○) 1.25×10^{-4} mol/L; (△) 2.5×10^{-4} mol/L; (□) 5.0×10^{-4} mol/L; (▽) 1.0×10^{-3} mol/L.

Fig. 9. Relation between amount of C. I. Acid Orange 7 on silica gel plate and integrated K/S value from K/S image. The concentration of dye stock solution to prepare the dye spots was 2×10^{-3} mol/L.

るように、ろ紙上の Acid Orange 7 の量と画像の $\Sigma K/S$ との間には極めて良好な直線関係がある。低い色素濃度の水溶液から大きなサイズのスポットをした試料と、高い色素濃度の水溶液から小さなサイズのスポットをした試料とを比較しても、その総色素量が同じであれば、正確に同じ $\Sigma K/S$ 値が得られていることがわかる。

同様の検討をシリカゲル薄層板を基質に用いて行なったのが図 9 である。同様にスポットの色素総量と画像の $\Sigma K/S$ との間には、スポットサイズ、形などに関係なく良好な直線関係が得られている。

このような、画像による色素の定量法は、他の機器では困難であったもので、繊維上の色素や汚れの定量に有効な手段となることが期待できる。前項で述べた分光反射スペクトル、および色彩のパラメータの情報とを総合すれば、基質上の色素に関する極めて多くの知見が、分光画像を取り込むことによって一括して得られる。

4. 総 括

コンピュータ画像処理装置を応用した二次元的な色彩管理システムとして、応用範囲が広く高い精度の期待できる分光反射率測定式画像測色システムを検討した。本システムについて、着色レント紙を用いて絶対反射率を測定した結果、分光光度計による測定結果と非常に良い一致を示した。また、三刺激値 X , Y , Z を算出し比較したところ、本システムは十分な精度を有することがわかった。

さらに、本システムが画像全体において正確なスペクトル反射率を与えることを利用して、Kubelka-Munk 関数により、紙などの基質上に存在する色素の量を定量する試みを行った。その結果、非常に精度の高い定量結果が得られた。

従って、画像処理装置を測色に応用することによってスポットのみならず二次元的なスペクトルの変化にも対応できる新しい色彩管理システムの可能性が示された。

付記：本研究の一部は第31回染色討論会(1989, 東京)で発表した。

文 献

1. 寺主一成, 染色工業, **35**, 413 (1987)
2. 徳永 隆, 染色工業, **35**, 414 (1987)
3. 片平春夫, 山田広行, 染色工業, **35**, 420 (1987)
4. 鈴鹿正和, 染色工業, **35**, 430 (1987)
5. 寺主一成, 「色材色彩工業」, 色染社, (1984)
6. 田川由利香, 上田充夫, 平嶋恒亮, 繊消誌, **30**, 355 (1989)
7. 日本色彩学会編, 「色彩科学ハンドブック」, 東京大学出版会, 756 (1980)
8. 日本工業規格 JIS Z 8701-1981, 2 視野 XYZ 表色系による色の表示方法
9. P. Kubelka, F. Munk, *Z. Tech. Physik*, **12**, 593 (1931)