カラーヒストグラムからの直線検出に基づいた色ベクトル推定法

正会員 富永昌治[†], 西辻順一[†]

A Method for Estimating Color Vectors Based on Line Detection from a Color Histogram

Shoji Tominaga[†] and Jun-ichi Nisituji[†]

Abstract This paper describes a method for estimating the color vectors of a light source and an object surface by means of line detection from a histogram of the color image. The object is supposed to be an inhomogeneous dielectric object such as plastics with a smooth surface. First, we suggest the characteristics of the color histogram in a RGB space. The histogram forms a combination of two straight clusters of highlight pixels by specular reflection, and matte pixels by diffuse reflection. The estimation of two color vectors is then reduced to finding the gradients of straight lines for the two clusters. Next, basic algorithms for extracting a line from a cluster are shown using the principal component analysis and Hough transform. Moreover, an effective algorithm is proposed based on iteratively splitting and merging the histogram on the color signal plane. Finally, the usefulness of the method is shown in an experiment.

1. ま え が き

自然界に存在する物体および人工的に作った物体の多くは2色性の光反射特性を有し、反射光の色は拡散反射による物体色と鏡面反射による光源色の混色であることが知られている^{1)~4)}。実際物体表面に現れるハイライトや光沢は、照明光が表面で鏡面反射したもので、このような部分の計測画像は光源色の影響を強く受けている。つまり、カラー画像から物体を認識するために、まず物体色を光源色から分離して抽出する必要がある。また、光源色を知ることは計測画像の白色

基準が決まるので重要である。

このようなカラー画像から光源色や物体色の色ベクトルを推定するために、これまで2色性反射の性質やRGB空間でのヒストグラムの特徴が利用されてきた。まず光源色を推定する手法として、2つの物体のハイライト領域を使用する2平面交差法²⁾⁴⁾やカラーヒストグラムを形成する線形クラスタの方向ベクトルを検出する方法⁶⁾⁷⁾などがある。前者は、2種類の色分布の共通成分として光源色を推定する手法で、常に複数物体の観測データが必要である。後者は、カラーヒストグラムの方向ベクトルから推定するために、直線的

キーワード: カラー画像, ヒストグラム, 光源色, 物体色, 直線検出, 物体認識

1996年4月17日受付, 1996年7月1日再受付

[†] 大阪電気通信大学 情報工学部 (〒572 寝屋川市初町18-8, TEL 0720-24-1131)

[†] Faculty of Information Science & Engineering, Osaka Electro-Communication University (18-8, Hachou, Neyagawa-shi, Osaka 572, Japan)

なヒストグラムの変化点を見つけて、それを分割する手法(以下では変曲点検出法と呼ぶ)である。これは1つのハイライト領域から光源と物体の両色を推定できる利点があるが、ヒストグラムの変曲点を検出することは容易でなく、あくまでも粗い推定にとどまる。物体色の推定に使用できる従来法としては、変曲点検出法と四分円解析法⁵⁾が存在する。後者はヒストグラムの端点を検出するため雑音の影響を受け易かった。

本論文では、カラーヒストグラムから反復的な直線検出の手段によって光源色と物体色の両色ベクトルを高精度に推定する方法を提案する。対象物体は表面が滑らかなプラスチックのような不均質誘電体物体とし、撮影に際して他の物体からの相互反射の影響はないものと想定する。このとき RGB 空間でのカラーヒストグラムは、2種類の直線的なクラスタからなる。ひとつは物体表面のハイライト部の画素で、他方はマット部の画素から形成され、直線的クラスタの傾きが各色ベクトルに対応している。ここでは不明確なヒストグラムの変曲点に頼らず、2つのクラスタを構成する直線を反復的に検出するアルゴリズムを検討する。つまりヒストグラムの分割・融合を繰り返すことによって、信頼できる直線成分を検出する。なおクラスタから1本の直線を決定する最も基礎的なアルゴリズムとして、主成分分析と Hough 変換の2種類の方法を用いる。

以下では、まず2章でカラーヒストグラムの特徴を述べる。3章で直線検出の基本的手法を述べ、4章で色ベクトル推定の具体的なアルゴリズムを示す。5章は実験結果で推定法の性能を評価する。

2. カラーヒストグラムの特徴

プラスチックや塗料のような不均質物体の光反射は標準の2色性反射モデルで記述することができる²⁾。すなわち物体から観測される色信号は鏡面反射と拡散反射の2つの成分の線形結合で記述され、しかも鏡面成分は光源色に一致する。いま RGB 空間で光源色の正規化ベクトルを $\mathbf{e}$ 、拡散反射成分による物体色の正規化ベクトルを $\mathbf{c}_D$ と記す。このとき画素 x で観測される色ベクトル $\mathbf{C}(x)$ は

$$\mathbf{C}(x) = w_D(x)\mathbf{c}_D + w_S(x)\mathbf{e} \quad (1)$$

と表される。ただし相互反射の影響はないものとし、 $w_D(x)$ と $w_S(x)$ は拡散反射と鏡面反射の重み係数である。ベクトル $\mathbf{c}_D$ と $\mathbf{e}$ は RGB 空間で平面(色信号平面)を定義し、すべての観測色ベクトル $\mathbf{C}(x)$ はこの平面上に存在する。

さて、現実にはこの平面的な分布はさらに限定され

(a) RGB 空間でのヒストグラム

(b) 色信号平面への射影

図1 プラスチック物体の計測画像から得られたカラーヒストグラム

Color histograms obtained from the measured image of a plastic object.

(a) Histogram in a RGB space, (b) projection onto the color signal plane.

て、なめらかな凸物体であれば、折れ線のような色分布になることが知られている²⁾。実例として図1に、プラスチックの円筒物体を撮影した画像のカラーヒストグラムを示す。物体の色は緑で、正面方向からランプで照明し、ほぼ同じ方向から撮影した。図1(a)は円筒側面に現れたハイライトを含む領域の画素が RGB 空間でどのように分布するかを示している。図1(b)は(a)のカラーヒストグラムを色信号平面に射影したものである。カラーヒストグラムは折れ線の分布をしており、直線的な2つの画素のクラスタが接合した形状であることがわかる。原点から伸びているクラスタは拡散反射のみからなるマットな領域の画素集合で、この先端から始まるクラスタは鏡面反射成分の強いハイライト領域の画素集合である。

なお鏡面反射が強い場合は、ハイライトクラスタが RGB 空間でクリップされる。本研究ではこれを避けるため、カメラのシャッタースピードを変えて撮影し、複数枚の画像を結合して1枚の計測画像としている。図1ではシャッタースピードを1/125, 1/250, 1/500, 1/1000 と変えた。これによりカメラのダイナミック

図 2 直線的なヒストグラムの型
Types of linear histogram.
(a)Skewed L type, (b)skewed T type.

レンジが擬似的に拡大されることになり、色空間は等価的に大きくなっている。

さて、1つの物体に対するヒストグラムで、マッドクラスタの方向ベクトルが物体色ベクトル $\mathbf{c}_D$ に、ハイライトクラスタの方向ベクトルが光源色ベクトル $\mathbf{e}$ に対応する。すなわちヒストグラムを形成する2つの直線的クラスタの傾きを知ること、光源色と物体色を推定することができる。上記のようなヒストグラムの折れ線の形状を傾斜した L (skewed L) タイプと呼称することが多い (図 2(a) および文献 3) 参照)。しかし計測の際の雑音や物体表面のざらつきのため、折れ点はヒストグラム上で必ずしも明確でなく、本来の折れ点付近が湾曲することもあり、変曲点検出の方法では誤差が出ることは明らかで、ヒストグラムの全体的な形状を利用する必要があるといえる。さらに照明の方向がカメラの視線方向から大きくずれば、折れ線の形状は図 2(b) のように傾斜した T (skewed T) タイプに変化する性質がある。

3. 直線検出の基本的手法

3.1 主成分抽出法

主成分分析は2次元カラーヒストグラムのクラスタを解析するために適している。このときデータ集合から得られる第1主成分ベクトルは、2次元クラスタが最大に分布する長軸方向を指示し、第2主成分ベクトルはそれに直交する方向を指示している。しかも第1主成分ベクトルは、データ集合を直線にあてはめたときの最小2乗解に一致している。具体的な計算は以下の通りである。

いま色信号平面に射影した観測色ベクトルを $\mathbf{C}$ とする。ベクトル $\mathbf{C}$ の平均値 $\mathbf{m}$ と共分散行列 $\mathbf{R}$ は次式で定義される。

$$\mathbf{m} = E[\mathbf{C}], \quad \mathbf{R} = E[(\mathbf{C} - \mathbf{m})(\mathbf{C} - \mathbf{m})^t] \quad (2)$$

記号 E は平均操作を意味し、与えられたデータ集合上で算出される。直線検出のためのデータ集合はカラーヒストグラムを区分的に分割して与えるが、これの具体的な手続きは次章で詳述する。行列 $\mathbf{R}$ を直交分

解すれば、固有値 λ_1, λ_2 ($\lambda_1 \geq \lambda_2$) と固有ベクトル $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ が得られる。ベクトル $\mathbf{u}_1$ が主成分直線の方向ベクトルを表す。

3.2 Hough 変換法

Hough 変換は、雑音を含む低品質画像から直線を検出するための有効な手段として知られている^{8)~10)}。この方法は、上述の直線 fitting の方式と異なり、直線を切片と傾きのパラメータ空間に写像し、パラメータ空間で最大の累積度数をもつ直線を最も可能性の高い直線として検出する。

いま色信号平面を画像平面とみなせば、我々の問題は画像中から2つの直線を検出することになるので、Hough 変換の適用が可能である。ただ、画像の各点に対してパラメータ空間での軌跡をそれぞれ描くため、この変換の利用には処理時間がかかる問題がある。ここでは対象が2値画像ではなく、ヒストグラムであるという特殊性を考慮して、Hough 変換の利用を高速化することを工夫する。

さて (x, y) 平面上の直線をパラメータ (ρ, θ) を用いて

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (3)$$

で表現する。ただし ρ は原点から直線へおろした垂線の長さ、 θ は垂線の角度(垂角)である。このとき色信号平面上の1点 (x, y) を通るすべての直線群は、 (ρ, θ) のパラメータ空間で1本の正弦曲線に写像される。逆にパラメータ空間上の1点は、色信号平面上で1本の直線に対応する。また同一直線上の任意の点に対応する正弦曲線は、パラメータ空間上で1回だけ交差する性質がある (図 3 参照)。したがって直線を検出するために、まずパラメータ空間を図 3(a) のように2次元配列で表現し、色信号平面上の点を(3)式に従って配列に投票という形で軌跡を描く。

このときヒストグラムはクラスタを形成しており、色信号平面上でかなり点が集積している。したがって1点ごとに軌跡を描かずに、あらかじめ色信号平面を2次元配列で表現しておき、 (x, y) 配列の度数を (ρ, θ) 配列上で通過度数として累積してゆけばよい。最終的に (ρ, θ) 配列に累積した度数のピーク点を探索することによって、直線成分を抽出する。

さらにパラメータ探索の効率化のために階層的的手法¹⁰⁾¹¹⁾を採用した。この手法は、最初解像度の粗いパラメータ空間で軌跡を描写・累積し、次に軌跡が集中した部分の解像度を上げる。そしてその部分空間での軌跡の描写・累積を再度行ってゆく方式である。以下のような特徴を用いて階層的手法による累積点検出を行った。

(a) (ρ, θ) 空間での正弦曲線

(b) (x, y) 平面での直線

図 3 パラメータ空間 (ρ, θ) と平面 (x, y) との関係
Relationship between the parameter space (ρ, θ) and the plane (x, y) .

(a) Sine curves in the (ρ, θ) space, (b) straight line on the (x, y) plane.

- (1) 分割したクラスタから 1 本の直線のみを検出する方式であるので、常に累積点の最大ピークのみを配列から決定する。
- (2) 直線の傾きを精度良く推定すればよく、つまり θ の解像度のみを向上させる。
- (3) 物体色に対するマツクラスタは原点を起点とする直線である。すなわち物体色の直線検出には $\rho=0$ が既知である。

4. 具体的アルゴリズム

4.1 反復的直線検出

前述のように、色信号平面上的ヒストグラムはマツクラスタとハイライトクラスタから成るが、これらのクラスタの接合部は常に不明確である。そこで、ヒストグラムを反復的に分割・融合することにより、接合部を検出することなく、全体の画素集合から 2 種類の直線を精度良く抽出する手法を示す。この基本的な考え方は次の 2 点に集約される。

- (1) クラスタの接合部のあいまいさのため、カラーヒストグラムの中心部よりも両端に伸びる線形クラスタからできるだけ長いものを抽出する。
- (2) 2 種類の直線を同時に検出せずに、一方の線形クラスタの直線検出を完了してから、他方へと逐次的に処理する。すなわちカラーヒストグラムからは常に 1 本の直線のみを検出する。

さて前章の主成分抽出法あるいは Hough 変換法を用いて、まず最初にカラーヒストグラム全体から 1 本の直線を抽出する。この直線に沿って元のカラーヒストグラムを 2 分割する。分割したヒストグラムから再び直線を検出して、最初の直線と比較する。直線の傾きが許容範囲内で一致するまで、同様な分割を両側で続ける。その後は、得られた線形クラスタを核にして中央部に向かって隣接する画素集合を順次融合させる。この操作では線形クラスタを拡張させて、より大きいヒストグラムから統一した直線の傾きを決定する。

次に具体的な手順を示す。図 4 のようなヒストグラムを想定する。直線検出の基本アルゴリズムとしては主成分抽出法と Hough 変換法のいずれを用いてもよい。

- (1) ヒストグラムの全画素から 1 本の直線 (図 4 の破線) を抽出する。
- (2) 色信号平面上でヒストグラムの重心点を求める。この重心点を通り、(1) で得られた直線と垂直に交わる垂線を最初の分割線①とする。①で分割した右の画素集合 $[\textcircled{1}, A]$ に対して直線を求め、(1) の最初の直線と傾きの比較をする。このとき両者の傾きは明らかに異なる。
- (3) 画素集合 $[\textcircled{1}, A]$ の重心点から 2 番目の直線への垂線を求め、分割線②とする。画素集合 $[\textcircled{2}, A]$ から直線を抽出し、 $[\textcircled{1}, A]$ の直線と比較する。両者の傾きは再び異なる。
- (4) 同様に分割線③を求め、 $[\textcircled{3}, A]$ と $[\textcircled{2}, A]$ に対する直線の比較をする。このとき傾きは許容範囲内で一致する。これ以上細分化はせず、画素集合 $[\textcircled{2}, A]$ を核となる線形クラスタとして決定する。
- (5) 探索を中央部側に移し、画素集合を融合して拡大化を図る。まず画素集合 $[\textcircled{1}, \textcircled{2}]$ を 2 分割する垂線④を求める。そして $[\textcircled{4}, A]$ からの直線とすでに得られた $[\textcircled{2}, A]$ の直線と比較する。この場合、一定の許容範囲で傾きが一致したので、 $[\textcircled{4}, A]$ の拡大クラスタが決まる。

図 4 カラーヒストグラムの分割と融合
Splitting and merging of a color histogram.

- (6) 次に [①, ④] を 2 分割する垂線⑤を求めて、[⑤, A] の直線と [④, A] の直線を比較し、融合を重ねて [⑤, A] を線形クラスタとして決定する。
- (7) 同様にして [⑥, A] の直線が得られる。ここで残りの集合 [①, ⑥] の画素数が基準値以下になったので融合を終了する。なお融合の過程では、画素集合の融合の条件として、傾きが許容範囲内であること以外に、対象とする画素集合の画素数が一定数（例えば、全画素数の 1/10 以上）存在することを融合を続ける条件としている。上の場合、[⑥, A] ではこれら 2 条件を満足していたが、次のステップで残り [①, ⑥] の画素数が少なくなったので終了している。

以上で光源色ベクトルに対する線分が確定した。ヒストグラムの残りの部分 [B, ①] についても、全く対称的な処理で線形クラスタの決定を行う。最終的に [B, ⑩] が最大の線形クラスタであることがわかり、これより物体色ベクトルの線分が抽出された。

4.2 反復検出法の特徴

本検出アルゴリズムは反復的に直線的クラスタを抽出して、その傾きから光源色と物体色の色ベクトルを推定している。直線検出の信頼性を高めるために、常に曲がりの少ないヒストグラムの両端部を含む領域から直線検出を行っている。しかも、できるだけ大きい線形クラスタを抽出する必要があるため、第一段階で抽出したヒストグラム両端の線形クラスタを初期値とし、画素集合を順次融合してクラスタの拡張を行っている。

拡張の理由は以下のようなものである。実測データに基づいてヒストグラムの形状を調べれば、ヒストグラムの両端部は常に直線的であるが、光源色のクラスタと物体色のクラスタの接合部は明確でなく、湾曲していることが多い。例えば、光源色についていえば、接合部付近で画素集合の直線の傾きは物体色の影響を受けて

図 5 線形クラスタを決定する過程
Process for determining linear clusters.

いるため、その方向にずれる。しかし、接合部から離れるにつれて傾きは光源色ベクトルの傾きに一致するようになる。このようなことから、接合部とは逆の先端部を含む線形クラスタを 2 分割によって、まず抽出する。そして、これを核として残りの画素集合を細分割しつつ融合すれば、線形クラスタの拡張が可能となる。

図 5 は、図 4 のカラーヒストグラムを対象として、分割・融合によって線形クラスタを決定する過程を画素数（度数）を基にして描いている。区間 [A, B] の横棒は与えられた全画素集合を表し、ハッチングは線形クラスタとして確定した画素の集合を意味する。この過程は 2 分木探索と類似しており、第 1 段の細分化とは、画素集合を 2 分割しつつ、top-down 的に直線の傾きの一致を探索する過程である。常に重心点で分割するので、画素数はほぼ 2 等分される。この第 1 段により、先端部を含む約 1/4 の画素集合から線形クラスタの核が決定する。第 2 段の融合化では、隣接画素集合を核クラスタに順次融合させることによって線形クラスタを拡張している。この過程では、少しでもクラスタを大きくするため、残りの画素集合を再度 2 等分割しつつ、隣接集合を融合していることに注目する。

このように、本アルゴリズムは画素数を等分するようにカラーヒストグラムを分割するため、ハイライト部の画素数とマット部の画素数が均衡しているならば、大変効率的で信頼性の高い検出アルゴリズムといえる。

4.3 全体的な処理手順

計測したカラー画像から対象物体表面の物体色および照明光の光源色を推定するための全体的な手順を示す.

- (1) カラー画像から光沢あるいはハイライトを含む領域を抽出する. この操作を容易にするために, 計測画像をHSV表色系で表色する. HSV表色系は色相 (H), 明度 (V), 彩度 (S) の3属性で定義される色空間である. これの均等色空間を作るために, RGB値からの変換式として次式を使用した⁶⁾.

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(g-b)}{(r-g)+(r-b)} \right) \quad (4)$$

$$S = \text{Max} - \text{Min} \quad (5)$$

$$V = \frac{r+g+b}{3} \quad (6)$$

ここで rgb は正規化した RGB 値で, Max と Min はそれらの最大値と最小値である.

$$\begin{aligned} r &= R/255, \\ g &= G/255, \\ b &= B/255 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Max} &= \max\{r, g, b\}, \\ \text{Min} &= \min\{r, g, b\} \end{aligned} \quad (8)$$

光沢やハイライトは高輝度であるので, このような均等色空間では V 値が大きい領域に対応し, 領域分割のアルゴリズムによってこのような領域を比較的容易に抽出することができる. なお, 画像中の強いハイライト領域は, 白くて物体色と明らかに異なって見えることがある. このような場合, 直接画像からの色の違いに基づいて領域を切り出すことができる.

- (2) 抽出した画像領域について色信号平面を決定し, この上でヒストグラムを作る. まず領域の RGB データを主成分分析し, 固有値 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\sigma_i \geq \sigma_{i+1}$) と対応する固有ベクトル v_1, v_2, v_3 を得る. このとき最初の2つの主成分による寄与が充分大きいこと, すなわち $(\sigma_1 + \sigma_2)/(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \approx 1$ より RGB データが2次元的であることを確認する. 色信号平面は2つのベクトル v_1 と v_2 によって張られる平面として定まる. 次に, 変換行列 $[v_1, v_2]$ を用いて各画素の3次元色ベクトル C を

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = [v_1, v_2]^t C \quad (9)$$

の形で, 2次元平面に投影する. なお RGB 空間の原点 $(0, 0, 0)$ は色信号平面の原点 $(0, 0)$ に

対応する.

- (3) 色信号平面上の画素集合に対して, 前述の直線検出アルゴリズムを適用して2種類の直線を検出する. 光源色と物体色に対する直線の傾きベクトルを, それぞれ, $[c_1^l, c_2^l]^t$ と $[c_1^p, c_2^p]^t$ と置く (ただし $c_1^2 + c_2^2 = 1$). このとき RGB 空間で2つの色成分ベクトルは

$$e = c_1^l v_1 + c_2^l v_2 \quad (10)$$

$$c_D = c_1^p v_1 + c_2^p v_2 \quad (11)$$

と復元できる. このように光源色と物体色の推定値が e と c_D として求まる.

5. 実 験

5.1 条 件

ハロゲンランプのもとで緑のプラスチックの円筒を計測した. ヒストグラムは図1の通りで, その特徴はすでに説明した. 円筒側面に鏡面反射が存在し, シャッタースピードを変えて合成した画像から 130×65 画素を切り出した. 図1(a)はRGB空間のカラーヒストグラムであり, (b)は色信号平面上のヒストグラムである. このヒストグラムに対して前述のアルゴリズムを適用して2種類の直線を検出した.

Hough変換法を適用する際, 図1(b)の色信号平面を 1500×1500 の配列で表し, 直線の角度と長さを, それぞれ, $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $-200 \leq \rho \leq 200$ の範囲で検索した. また階層的に効率良く探索するために (ρ, θ) 配列を 100×100 程度の小さなものとし, 最初は全区間 $[-90^\circ, 90^\circ]$ で探索し, ついで累積度数のピーク点を中心に区間を半分の $[-45^\circ, 45^\circ]$ にした. このように探索区間を半分 (あるいは解像度を2倍) にする操作を6回程度繰り返せば, 充分精度の高い推定値が得られた.

図6 Hough変換法で抽出した直線的なクラスター
Straight clusters extracted by the Hough transform method.

図 7 色信号平面上での直線検出の結果
Results of line detection on the color signal plane.

(a) 光源色

(b) 物体色

図 8 推定した光源色と物体色の色度の比較
Comparison of the estimated chromaticities for the light source color and the object color.
(a) Light source color, (b) Object color.

また、ヒストグラムを分割・融合して直線的なクラスタを抽出する過程では、2直線の傾きの一致を頻繁に判定している。本実験ではこの判定基準として、傾きの差が 2° 以内ならば一致するものとした。また融合の過程で、融合を続行するための条件として、対象

とする画素集合の画素数が全画素数の1/10以上であることを条件とした。この基準は主成分抽出法とHough変換法の両方に共通である。

5.2 結果

図6に、Hough変換法を用いて抽出した2つの線形クラスタを示す。ハイライトクラスタは鏡面反射が強く非常に長い。一方、物体色のクラスタは短い。分布はかなり稠密である。主成分法でも同様な線形クラスタが抽出された。図7は、これらの線形クラスタを構成する直線を描いている。推定の信頼性を調べるために、他の手法によって得られた直線も同一グラフに描いている。図中で計測値(measurement)とは分光放射輝度計を用いて光源と物体色を直接計測し、これらの測色値に基づいて描いたものである。また従来法との比較のために、光源色には変曲点検出法(図7でturning pointと記す)と2平面交差法(intersectionと記す)を適用した。ただし2平面交差法には別のプラスチック物体を追加して計測した。また物体色推定の従来法として変曲点検出法と四分円解析法(quarter circleと記す)を適用した。

さて図7を詳細に見れば、光源色を表す直線群の中で、2平面交差法による直線は測色値とほぼ一致していることがわかる。つまり、複数物体を使用すれば推定精度が確実に向上する。次いでHough変換法、主成分法、変曲点検出法の順である。本論文で提案したアルゴリズムによる2直線は近い傾きを持ち、従来法よりも高精度である。また物体色を表す直線群でも、Hough変換法と主成分法はともに、2種類の従来法と比べて測色値を充分近似していることがわかる。

推定した光源と物体の色ベクトルをRGB値で表せば以下の通りである。

Hough変換を用いた場合：

$$e = [0.531, 0.587, 0.612]^t,$$

$$c_D = [0.192, 0.909, 0.371]^t$$

主成分を用いた場合：

$$e = [0.529, 0.592, 0.608]^t,$$

$$c_D = [0.192, 0.917, 0.350]^t$$

さらに測色精度を調べるために、これらのRGB値からxy色度を予測した。このため、あらかじめ既知の色見本を同一カメラと照明のもとで測色し、CIEの三刺激値を予測するRGB-XYZ変換行列を作成しておいた。図8(a)は推定した光源色の色度点をCIE-xy色度図上で拡大してプロットしている。図8(b)は物体色の色度点である。色度の推定についても上述の直線推定の結果と同様な傾向が見られる。いずれの場合も、ここで提案した直線検出アルゴリズムが従来

法よりも優れているといえる。

使用した2つの直線検出法を比較すれば、本実験では Hough 変換を利用した方が主成分法よりも高精度であった。処理時間については、Hough 変換法は主成分法の2.8倍程度の時間を要した。一般的に色信号平面を粗くサンプルして小さな配列で表現すれば、処理時間は短縮できるが、Hough 変換法の推定精度は低下する。

6. む す び

本論文では、カラー画像のヒストグラムから反復的な直線検出の手段によって光源色と物体色を推定する方法を述べた。対象物体は表面が滑らかなプラスチックのような不均質誘電体物体とした。このとき RGB 空間でカラーヒストグラムは2種類の直線的なクラスタから成り、ひとつは物体表面のハイライト部の画素で、他方はマット部の画素から形成された。光源と物体の色ベクトル推定は、これらの2種類の直線的クラスタの傾きを検出することに帰着した。まずクラスタから1本の直線を抽出する基本的アルゴリズムとして、主成分抽出法および Hough 変換法の2つの方法を示した。次に、効率的に2直線を検出するために、2次元色信号平面上でヒストグラムを反復的に分割・融合するアルゴリズムを提示した。計測画像のカラーヒストグラムを用いた実験で、提案した推定法の有用性を示した。

本推定法を応用する上で重要な特徴は、カラー画像の光沢やハイライトを含むひとつの領域から、光源色と物体色の両方を精度良く推定できる点である。しかも簡単な手続きのため、一般カラー画像解析や物体認識、製品検査等における基本処理として広く応用できる。主成分抽出法と Hough 変換法のどちらが直線検出に適しているかは、決めることができなかった。処理速度については前者が優れ、推定精度については後者が優れる場合がある。アルゴリズムは明らかに前者

が簡単である。最後に、物体表面が滑らかでなくて粗い場合、カラーヒストグラムの形状は折れ線にならない。このような場合の色推定問題は今後の検討課題である。

【参 考 文 献】

- 1) G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade: "The Measurement of Highlights in Color Images", Int. J. Computer Vision, **2**, pp. 7-32 (1988)
- 2) S. Tominaga and B. A. Wandell: "The Standard Surface Reflectance Model and Illuminant Estimation", J. Opt. Soc. Am. A, **6**, pp. 576-584 (1989)
- 3) G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade: "A Physical Approach to Color Image Understanding", Int. J. Computer Vision, **4**, pp. 7-38 (1990)
- 4) 富永昌治: "物体のカラー反射モデル", 情処学論, **33**, pp. 37-45 (1992)
- 5) 富永昌治: "カラー反射モデルを用いた相互反射の解析", 情処学論, **34**, pp. 302-311 (1993)
- 6) 富永昌治, 今村淳志: "複数の不均質物体に対するカラー画像の解析", 情処学論, **35**, pp. 79-91 (1994)
- 7) S. Tominaga: "Analysis of Object Color Images using a Reflection Model", テレビ誌, **50**, pp. 577-585 (1996)
- 8) P. V. C. Hough: "Method and Means for Recognizing Complex Patterns", U. S. Patent 3069654 (1962)
- 9) R. O. Duda and P. E. Hart: "Pattern Classification and Scene Analysis", John Wiley & Sons (1973)
- 10) 松山隆司, 奥水大和: "Hough 変換とパターンマッチング", 情報処理, **30**, pp. 1035-1046 (1989)
- 11) 富永昌治, 西辻順一: "Hough 変換を用いたカラー画像からの色ベクトル推定", 信学技報, PRU 94-8 (1994)

とみなが しょうじ
富永 昌治 1970 年, 大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。1975 年, 同大学院博士課程修了。電子技術総合研究所大阪支所を経て, 1976 年, 大阪電気通信大学勤務。1986 年, 教授。1987 年, スタンフォード大学客員教授。色彩情報処理, コンピュータビジョン, 画像処理などの研究に従事。工学博士。正会員。

にしつじ じゅんいち
西辻 順一 1994 年, 大阪電気通信大学工学部精密工学科卒業。現在, 同大学院情報工学専攻博士前期課程在学中。カラー画像処理の研究に従事。