



液晶空間光変調器を用いた統計の色認識システム

豊 岡 了

埼玉大学工学部応用物理学講座 〒338 浦和市下大久保 255

(1991年11月18日受理)

Statistical Color Recognition System Using Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Satoru TOYOOKA

Laboratory of Applied Physics, Faculty of Engineering, Saitama University,
255, Shimo-okubo, Urawa 338

1. はじめに

視覚情報は空間的な位置の情報と色またはスペクトルの情報を含んでいる。マシンビジョンにおいてもこのような膨大な情報を効率的に処理するシステムが望まれており、光学情報処理技術が鍵を握る技術として多くの研究がなされている。一般に光学的パターン認識は、何らかの方法によって入力パターンと参照パターンあるいは二つの入力パターンの相関をとり、類似性の度合から入力パターンにある種の判断を下すものである。図形や文字の認識においてはコヒーレントマッチフィルタリングがよく知られている。これは参照パターンをフーリエ変換プログラムとして記録し、入力パターンと重ねることにより両者の相関を出力信号として得る方法である。波長の異なる複数のレーザー光を用いれば情報の多重化を行うことができる¹⁾。すなわち波長ごとに異なる複数の参照パターンを記録し、白色光で被験パターンを照明すれば、両者の相関信号が色によって識別される。カラー透過パターンと回折格子を重ね合わせたものを赤、緑、青 (R, G, B) 3本のレーザーで照射すれば分散面で空間的に分離し、参照パターンの空間的多重化を行うことができる²⁾。これらの方法は、入力パターンとある確定的な参照パターンとの相関を検出する方法である。

ところで、手書き文字認識を考えるとわかるように、参照パターンは一般に確定的ではないので、ある種の統計的規範によって決定できるとよい。この場合、文字を認識するということは、最終的に入力パターンと統計的

に設計された参照パターンを比較し、ある規則に従ってクラス分けをすることである。Guらは k クラスに分類する問題で、 n 次元ベクトルで表されるパターンに対してそれぞれのクラスに対応する k 個の単位直交ベクトルを二乗誤差が最小になるように設計する LSLMT (least-square linear mapping technique) および求められた参照パターンを計算機合成プログラム (CGH) に記録する光学的実行システムを提案している^{3,4)}。Tianらは LSLMT について総合的に比較検討している^{5,6)}。

コヒーレントフィルタリングは種々の興味ある光学的相関への応用が検討されてきたが、コヒーレントノイズに煩わされること、一般のインコヒーレント画像を対象とする場合は液晶ライトバルブのようなインコヒーレント・コヒーレント (IC) 変換器が必要になる、等の扱いにくい面もある。さらにスペクトル情報をも得ようとする必然的にインコヒーレント光学技術に頼らざるをえない。色のスペクトルを認識するためのインコヒーレントフィルタリングは次のようにして簡単に実現できる。すなわち、スペクトル軸にパターンベクトルを定義し、分散面に基準パターンに相当する透過率を持つフィルタを置き透過光量を検出すればよい。

以下、本小論では統計的パターン認識の一手法である部分空間法を色の認識に適用し、特に液晶空間光変調器に空間フィルタを書き込むことによる光学処理システムについて、筆者らの研究を紹介する。

2. 部分空間法による色の認識と分類

部分空間法は、ベクトル信号やパターンを元の表現空間の次元より低い次元の部分空間へ写像する線形変換で、パターンをより効率的に表現する方法である。これまでに音声認識や手書き文字、そしてここで述べる色の認識等の応用例が報告されている⁷⁾。ここでは Parkkinen ら⁸⁾に習って部分空間法を色の認識に適用する場合について説明する。いま観察しようとする色光のスペクトルを分散面で波長 400 nm から 700 nm の範囲で等しい波長間隔 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ でサンプリングしたときに得られる n 個の検出光強度をそれぞれ $\tau(\lambda_1), \tau(\lambda_2), \dots, \tau(\lambda_n)$ とする。このスペクトルは次のように n 次元空間内の列ベクトルとして表現することができる。

$$\tau(\lambda) = [\tau(\lambda_1), \tau(\lambda_2), \dots, \tau(\lambda_n)]^T \quad (1)$$

ここで、 T は転置を表している。 τ は n 次元ユークリッド空間を張る n 個の直交基底ベクトル $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ によって展開することができる。例えば、波長 400 nm から 700 nm のあいだを 10 nm 間隔でサンプリングしたとすると、一つのスペクトルは 31 次元空間におけるベクトルとして表現することができる。ところで、反射率や透過率の分光特性は一般にスムーズな分布で互いに強い相関がある。このような場合は、統計的パターン認識におけるカルファーネン・ロエーブ(K-L)展開または多変量解析における主成分分析の手法を用いることができる。元の次元 n より低い次元 p の部分空間 L を考え、 τ の部分空間 L への射影を次式で定義する。

$$\tau' = \sum_{i=1}^p (\tau^T v_i) v_i \quad (p < n) \quad (2)$$

射影ベクトル τ' の元のベクトル τ に対する残差が十分小さければ、 τ' を τ の近似値として採用することができる。ここで、部分空間の直行基底 $\{v_i\}$ は、対象とするサンプル集合全体についての相関行列の固有ベクトルである。相関行列は実対称行列であるから、すべての固有ベクトルは互いに直交する。また p 次元空間への射影の忠実度 (fidelity value) k をすべての固有値の総和に対する最初の p 個の固有値の総和の比

$$k = \frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3)$$

として定義し、この値に閾を設けることで次元 p が決定される。ここで λ_i は i 番目の固有値である。

部分空間 L は対象とするサンプル集合に応じて柔軟に設計することができる。例えば、われわれが日常目にする可視光領域の色空間全体を含む部分空間を作るため

には、空の色、動植物の色等自然界のあらゆる種類の色のサンプルをできるだけ多く偏りなく取ってきて分光反射スペクトルを測定し、それらの相関行列から固有ベクトルを求め、部分空間を決定すればよい。もし対象とする色空間が限られていれば話はもう少し簡単である。例えば、「植物の葉の色」というふうに限定すれば、世界中の植物の葉のサンプルをできるだけ多く集めてきて、それらをもとに部分空間を作ればよい。このように対象を限定すれば部分空間のスケールは小さくてすむ。すなわち小さい次元で十分な忠実度が得られるであろう。このような小さな部分空間を幾つも作り、入力パターンがどの部分空間に属するかを判定することによってパターンの分類を行うことができる。一例として2クラス問題を考える。二つのクラスに対応する部分空間 $L^{(1)}, L^{(2)}$ が決定されたとする。未知のサンプルがどちらのクラスに属するかを知るには入力サンプルの部分空間 $L^{(1)}, L^{(2)}$ への射影を求めればよい。分類規則として、入力パターンは射影スペクトルのノルムが大きいクラスへ分類されることにすればよい。別な言い方をすると入力 τ と部分空間 $L^{(j)}$ への射影 τ' の残差 $\delta(\tau, L^{(j)})$ (次式) が小さくなるクラスへ分類される、といってもよい。

$$\delta(\tau, L^{(j)}) = \left[\|\tau\|^2 - \sum_{i=1}^{p^{(j)}} (\tau^T v_i^{(j)})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 $v_i^{(j)}$ は j 番目の部分空間 $L^{(j)}$ の i 番目の固有ベクトル、 $p^{(j)}$ はその次元である。

このようにして各クラスの代表的なサンプルは正しく分類されるが、クラスの境界付近にあるサンプルに対しては誤分類を起こしやすい。このような場合は学習過程を繰り返すことによって正しい分類が行われるように部分空間を修正する方法が有効である。例えば、本来一つの部分空間 $L^{(1)}$ に属する訓練ベクトル τ が別の部分空間 $L^{(2)}$ に誤分類されたとする。詳細は文献7)を参照していただきたいが、基本的な概念としては、 $L^{(1)}$ を τ に近づけ、逆に $L^{(2)}$ を τ から遠ざけるように部分空間を回転すればよい。Kohonen による平均学習部分空間法(ALSM)⁹⁾ においては部分空間を直接回転するかわりに、反復学習のたびに相関行列を更新する方法を採用している。

3. 色の認識と分類の光学的実行システム

可視領域の色空間全体を含む部分空間は先にも述べたように、われわれが目にする世界の色を偏りなくサンプリングすればよい。しかし、現実問題としてこれは大変な作業である。Parkkinen らはマンセル色票系全体を

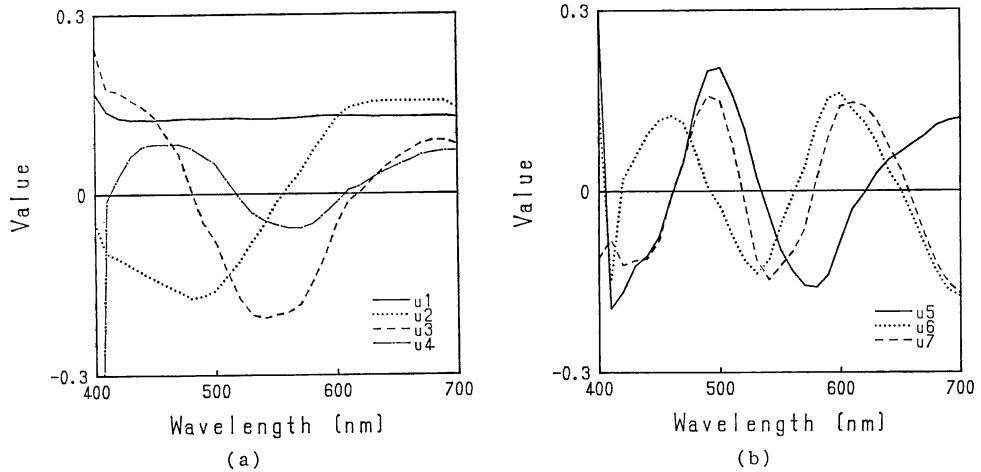


図1 マンセル色体系の 1,257 色から計算した上位 7 個の固有ベクトル

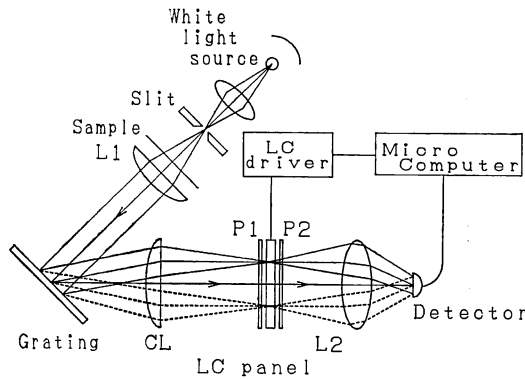


図2 色認識のための光学的内積演算器

可視領域を記述する集合として使うことを提案した。すなわちマンセル色票 1,257 色すべての反射スペクトルを測定し、それらの相関行列から固有ベクトルを決定し部分空間を作成した^{9,10)}。最初の七つの固有ベクトルを図1の(a)と(b)に示す。第一固有ベクトルはサンプル集合全体の平均のスペクトルを反映してほぼフラットな分布をしている。

われわれは(2)式の内積演算を光学的に並列に行うシステムを提案した¹¹⁻¹⁴⁾。図2に透過サンプル検査用光学系の概略を示す。ハロゲンランプからの白色光はスリットで絞られたのちほぼ平行光となって回折格子に入射する。この間にサンプルを挿入する。回折格子で反射した光は円筒レンズ CL の焦点面で紙面に垂直な方向に 400 nm から 700 nm の範囲で分散する。この分散面には直交基底ベクトルに相当する透過率分布を持つ液晶パネルが置かれる。液晶空間フィルタを通過した光はレンズで集められ、検出器で光電変換される。

ところで、透過率は非負であり、図1の分布そのものの空間フィルタを作成することはできない。われわれは固有ベクトル $\{v_i\}$ を次のように変換してフィルタ関数とした。

$$f_i = b(v_i + a), \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (5)$$

ここで b はスカラー定数, a はオフセットベクトルである。次節以下に実際に作成したフィルタにおいては, $b = 2, a = [0.25, \dots, 0.25]$ とした。このような透過率特性を持つフィルタ関数を順次差し替え、それぞれの光電出力を測定したのち、(2)式に従ってそれらを係数とする和をベクトルの成分ごとに計算すれば、 p 次元空間への射影が求められる。ただし、ベクトル $\{f_i\}$ は直交していないので、何らかの直交化を行わなければならない。厳密にはグラムシュミットの直交化を行えばよいが、ここでは簡単に(3)式を逆変換した $\{v_i\}$ に対してこれらの計算をした。

4. 液晶空間光変調器による空間フィルタ

空間フィルタは図2の分散面において(5)式で表されるような波長の関数として透過量が変化するようなものを作ればよい。第一の方法は(5)式で表される曲線の下側は完全に透過し、曲線の上側は完全に遮断するバイナリーなマスクを作成することである。これは光を遮断するシートをフィルタ関数の上側の形に切り抜き、分散面に置くことによって簡単に実現する。この種のフィルタは各波長域における透過率の値を透過部分と遮断部分の面積比でコーディングしているので、以後面積比型フィルタと呼ぶことにする。もう一つの方法は、分散軸に垂直な狭い波長帯ごとに関数曲線に沿って透過率に階調を持

たせたフィルタをすることである。このタイプのフィルタを階調型フィルタと呼ぶことにする。

面積比型フィルタは高精度のものを簡単に作る事ができるので、図2の光学系のように光学的な相関強度を1点で検出するような場合には便利である。しかし、後に第6章で述べるようにフィルタ透過後の光が空間的に一様である必要がある場合には階調型フィルタを用いなければならない。階調型フィルタは例えば写真フィルムに帯域を制限する可動スリットからの光量を調節しながら露光することによって作ることができるが、フィルムの非線形性や露光むら、帯域境界での重ね露光の問題などがあり技術的に困難を極める。これらの問題点を克服し書換え自在のフィルタを実現するために、透過率を外部からコントロールできる空間光変調器の利用が考えられる。要求されるスペックとしてはクロストークがないこと、コントラスト比(透過状態と遮断状態の透過光量比)が十分大きいこと、そして階調型フィルタの場合はある程度細かい階調が取れること等がある。ほぼこれらの要求を満たすデバイスとして市販の投影型液晶テレビに用いられている TFT アクティブ駆動方式透過型液晶パネルがある。われわれが用いた液晶パネルはシャープ製投影テレビに用いられているもので、画面サイズ 44.5 mm×61.7 mm、画素数 234×382、各画素の透過率はドライバーを通して 256 レベルでコントロールできる。実際に用いた光学系では液晶パネルの幅 30 mm の範囲に 400 nm から 700 nm の光が分散するようになっている。

はじめにこの実験で特に重要な液晶パネルの透過率の波長依存性を調べた。液晶パネルの前面に 10 nm 帯域幅を通すスリットを密着するように置き、各ピクセルへの入力レベルを変化させたときの透過光量を測定した。図3は 400 nm から 700 nm の間でスリットを移動し、各波長帯の特性を調べた結果を 50 nm おきに描いた図である。波長によって特性がわずかに異なっているが、いずれもコントラスト比は 70 から 130 と十分満足できる値である。この特性曲線より、面積比型フィルタは波長に関係なくフィルタ関数の上側をゼロレベルに、下側を飽和レベルにセットすることによって簡単に実現する。

一方、階調型フィルタは分散面に垂直な狭い領域ごとに所望の透過率になるように入力レベルを決定しなければならない。特性曲線は非線形で波長帯によってかなり異なっている。曲線自身の信頼性や安定性が全波長域で必ずしも保証されていない、等の問題があり、高精度の

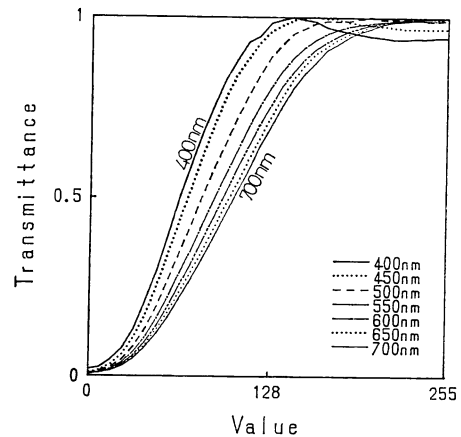


図3 液晶パネルの入力レベルに対する透過率の波長依存性

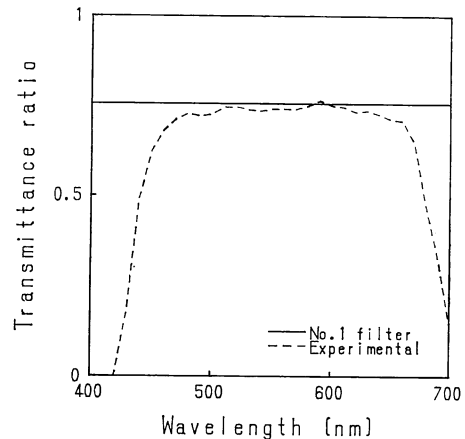


図4 第一フィルタのフィルタ関数(実線)と直接法によって作成したフィルタの透過率(点線)

空間フィルタを作ることは容易ではない。一例として、一定の透過率を持つ第一フィルタを特性曲線から直接作成し、透過率分布を測定した結果を図4に点線で示す。特に短波長側と長波長側で著しい誤差が生じている。

このような複雑な特性をもとにして最適なフィルタを作成する方法として、反復フィードバック法 (IFM) を提案する¹⁵⁾。まず、図3のような複雑な特性曲線のかわりに、図5に示すような一定勾配の直線 $\overline{OP_0}$ を仮定する。一つのスペクトル帯域内における目標とする透過率の値を t とする。図5の直線上で対応する入力レベル a_0 を一つ定め、液晶パネルに入力する。ここでは図2の光学系において L_2 を結像レンズとし、像面に点検出器の代りに CCD カメラを置く。実現する透過率は真の特性曲線上の点 Q_0 より t_0 になる。CCD カメラによ

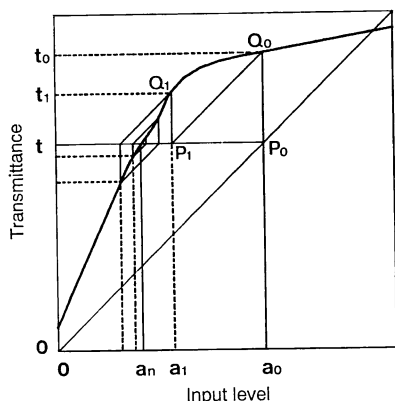


図 5 反復フィードバック法 (IFM) の概念図

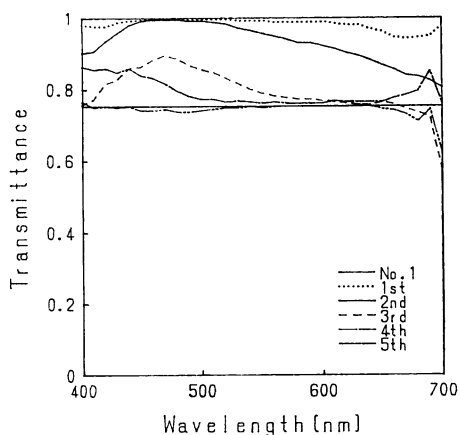


図 6 第一フィルタにおける IFM の実行結果

てこの値を検出し、これが目標とする透過率と異なる場合は、点 Q_0 から同じ勾配の直線 Q_0P_1 を引き、目標値 t と交わる点 P_1 より、第 2 の入力レベル a_1 を決定し再び液晶パネルに入力する。以下、同じ操作を繰り返す、すべての帯域で入力レベル a_n と一つ前の値 a_{n-1} の差がある値 ε より小さくなったところで繰り返しを終了し、その値を最終的な入力レベルとする。収束条件は次のように書くことができる。

$$|a_n - a_{n-1}| < \varepsilon \quad (6)$$

このアルゴリズムは非線形方程式の根を実験的に求める操作、ということができ、特性曲線が単調である場合には適用できそうである。 ε の値は 1 ビットにするのが最善であるが、実際には 3 ビットが限界であった。

目標とするフィルタ関数の値と IFM によって得られた透過率の偏差の平均は (6) 式より次のように見積られる。

$$\sigma < \varepsilon \alpha = 11.8 \times 10^{-3} \quad (7)$$

ここで α は仮定した直線の勾配で $\alpha=1/255$ とした。第一フィルタについて得られた IFM の結果を図 6 に示す。この場合、5 回の繰返しで液晶パネル全面で (6) 式の収束条件を満足した。図 4 と比較するとこの方法の有効性がわかる。

5. 実験 I, 色の認識と分類

この章では面積比型液晶空間フィルタを用いた色の認識と分類の実験を示す。はじめに、図 2 の光学系を用いて図 1 の 7 次元空間で赤色のサンプルのスペクトルを再現した結果を図 7 に示す。実線は透過色スペクトルを分散面で直接測定した結果である。それに対して点線は実線の分布を計算機上で 7 次元の部分空間で展開した結果である。最後に破線は光学的内積演算を実行してスペクトルを再生した結果である。3 本の曲線はほぼ一致している。

次に同じ光学系を用いて透過色サンプルの分類を行った結果を示す。対象とする色のクラスは黄と緑の 2 クラスで、マンセル色票から色相の異なるサンプルを 18 個ずつ選んだものを訓練色サンプルとした。すべての訓練サンプルの特徴ベクトルは図 2 の光学系で測定され、相関行列より固有ベクトルが求められ 2 次元の部分空間を作成した。図 8 (a), (b) に黄および緑の第一 (実線) および第二 (点線) 固有ベクトルがそれぞれ示してある。このようにして設計した部分空間を図 2 の液晶パネル上で実現した。36 色すべての訓練サンプルをこれら二つの部分空間で展開し、(4) 式に従って残差を求めた結果を図 9 (a) に示す。残差の小さいクラスに分類され

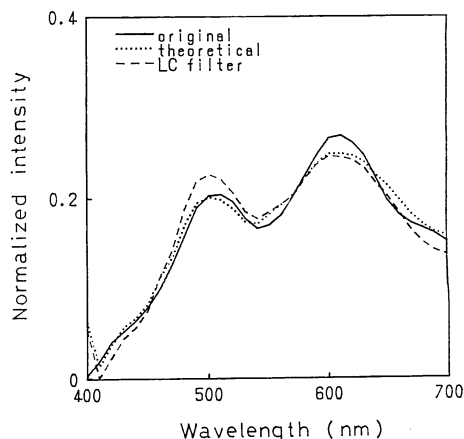


図 7 赤色サンプルのスペクトル (実線) の 7 次元部分空間における展開 (点線) および光学処理による再生 (破線) 結果

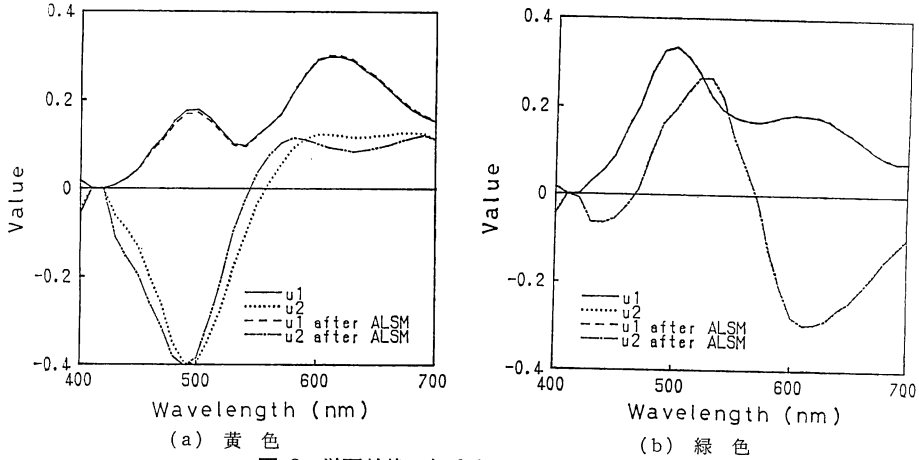


図 8 学習前後の部分空間の固有ベクトル

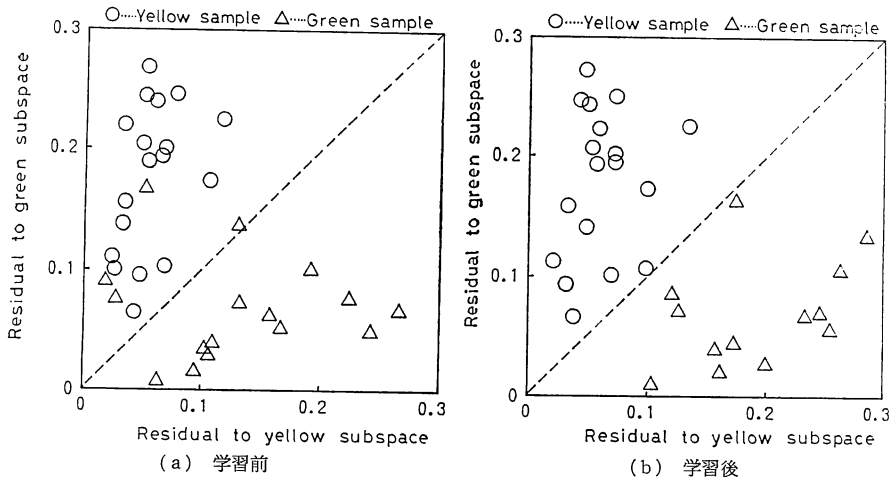


図 9 サンプルの各部分空間への残差

るといふ約束に従い分類すると、四つの緑サンプル(△印)で誤分類を起こしている。これらのサンプルは二つの部分空間の境界付近に位置する黄緑色である。このような場合はさきに述べた学習アルゴリズムを適用できる。この実験では5回の学習ですべての訓練サンプルが正しく分類されるようになった。学習後の二つの部分空間の直交基底ベクトルをそれぞれ図8(a),(b)に破線と2点鎖線で示した。また分類結果を図9(b)に示した。図8より学習によって緑の部分空間はほとんど変わらないが、黄色の空間がわずかに回転していることがわかる。対応して図9では誤分類をおこした緑サンプルが学習によって黄の部分空間から遠ざかっていることがわかる。訓練サンプル以外の緑と黄色のサンプル18個について分類試験を行ったところ、すべて正しく分類することができた。

6. 実験 II, カラー画像内の色の認識

次に同じ原理を空間的に色が分布する一般のカラー画像に拡張すると物体の各点における色を認識し分類するシステムが実現する。図10に実験系を示す。この場合

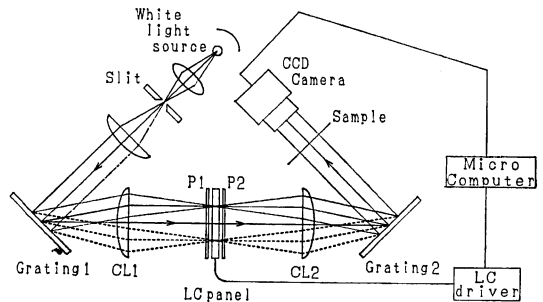


図 10 カラー画像解析用実験系

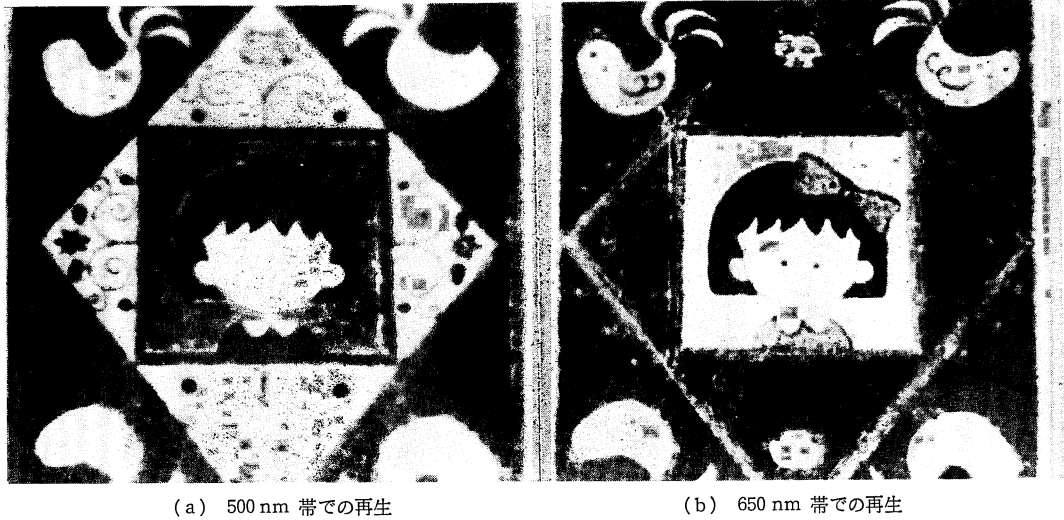


図 11 カラー画像の解析結果
©さくらももこ/(株)さくらプロダクション

は始めに白色光源からの光は分散面で液晶パネルを通過する。フィルタを通過した直後の光は直交基底に相当するスペクトル分布で空間的に分散している。これを第2の回折格子で混合することによって所望のスペクトル分布を持つ一様な明るさの光を得ることができる。ただしこの場合面積比型フィルタを用いると紙面に垂直な方向に分布をもってしまふので、階調型フィルタを用いなければならない。第2格子で混合された特定のスペクトルを持つ光は透過カラーサンプルを照射する。結像光学系を通した CCD カメラの画素ごとの光強度はフィルタ関数と画像内の点の分光透過率に対応する特徴ベクトルとの内積に比例する。液晶パネルのフィルタ関数を必要な次元数だけ書き換え、その都度 CCD カメラの画像データをフレームメモリに蓄えておく。データ収集が完了したら画素ごとに(2)式に従って部分空間への射影を計算する。

漫画「ちびまる子ちゃん」のカラーの表紙から作成したサンプル画像を7次元の部分空間で再生した結果を図11に示す。同図(a),(b)はそれぞれ500nmおよび650nmを中心とする幅10nmの帯域での成分強度を表示したものである。500nm帯では原画でライトブルーの菱形の背景が明るく再生されている。それに対して650nm帯ではオレンジ色の正方形の背景が明るく、菱形の背景が暗くなっている。赤いリボンとセーターは650nm帯では明るく再生されているが、500nm帯ではほとんど認められない。

7. おわりに

以上、統計的パターン認識の一手法である部分空間法を用いた色およびカラー画像の認識について筆者らの研究を中心に述べた。最近、カラー画像解析あるいは分光画像解析に関して異なる原理に基づいたいくつかの興味深い研究が報告されている¹⁶⁻¹⁸⁾。そんな中で筆者らの方法の特徴を一言で言えば、対象に応じたフレキシブルな空間を設計することができ、光学処理の段階で認識とか判断の一部を実行できることであろう。システムのキーデバイスとして複雑な分光特性を持つ液晶パネル上に空間フィルタを描く方法について多少詳しく述べた。透過率だけを制御すればよいのでコヒーレントフィルタに比べるとはるかに単純であるが、IFMの収束条件等今後検討していかなければならない課題が山積している。

なお、図11の「ちびまる子ちゃん」の画像は(株)さくらプロダクションのご厚意により使わせていただいたことを記し、ここに謝意を表します。

文 献

- 1) S. K. Case: "Pattern recognition with wavelength-multiplex filters," *Appl. Opt.*, **18** (1979) 1890.
- 2) F. T. S. Yu, T. H. Chao and S. L. Zuang: "Polychromatic processing technique for color image transparencies," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1887.
- 3) Z. H. Gu, J. R. Leger and S. H. Lee: "Optical implementation of the least-squares linear mapping technique for image classification," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 787.
- 4) Z. H. Gu, S. H. Lee and Y. Fainman: "Statistical

- recognition of color image," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 3145.
- 5) Q. Tian, Y. Fainman, Z. H. Gu and S. H. Lee: "Comparison of statistical pattern recognition algorithms for hybrid processing. I. Linear-mapping algorithms," *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1988) 1655.
 - 6) Q. Tian, Y. Fainman, Z. H. Gu and S. H. Lee: "Comparison of statistical pattern recognition algorithms for hybrid processing. II. Eigenvector-based algorithms," *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1988) 1670.
 - 7) E. Oja: *Subspace Methods of Pattern Recognition* (Research Student Press, 1983), 小川, 佐藤訳, 産業図書.
 - 8) J. Parkkinen and T. Jaaskelainen: "Color representation using statistical pattern recognition," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 4240.
 - 9) T. Kohonen: *Self-Organization and Associative Memory*, third ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1987) pp. 192-198.
 - 10) J.P.S. Parkkinen, J. Hallikainen and T. Jaaskelainen: "Characteristic spectra of Munsell colors," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 318.
 - 11) T. Jaaskelainen, J. Parkkinen and S. Toyooka: "Vector-subspace model for color representation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 725.
 - 12) T. Jaaskelainen: "Coloe recognition system," *光学*, **18** (1989) 2.
 - 13) T. Jaaskelainen, H. Saisu and S. Toyooka: "Color classification by optical calculation of vector inner product," University of Kuopio Report (1991) 1.
 - 14) T. Jaaskelainen, S. Toyooka, S. Izawa and H. Kadono: "Color classification by vector subspace method and its optical implementation using liquid crystal spatial light modulator," *Opt. Commun.* (投稿中).
 - 15) 早坂伸明, 伊沢 悟, 豊岡 了, 門野博史, T. Jaaskelainen: "ベクトル部分空間法によるカラー画像解析", 応物予稿集Ⅲ (1991) p. 829.
 - 16) S. Kawata, K. Sasaki and S. Minami: "Component analysis of spatial and spectral patterns in multi-spectral images. I. Basis," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 2101.
 - 17) 伊東一良, 一岡芳樹: "超多波長分光画像システム", 計測と制御, **29** (1990) 56.
 - 18) T. Okamoto and I. Yamaguchi: "Simultaneous acquisition of spectral image information," *Opt. Lett.*, **15** (1991) 1277.