

マルチバンド画像を用いた杉戸絵の復元

岩成 正一 岡田 至弘 村山 健二
龍谷大学 理工学部

概要

西本願寺書院において所蔵されている杉戸絵の色彩復元を行った。杉戸絵とは、杉板の上に描かれた桃山時代の障壁画である。現在、杉戸絵は、長年の太陽光の照射や汚れなどによって変色、退色が起きている。本報告では、絵に使われている色材の特定などを行わず、描かれた当時の鮮明な色彩復元を行った。そこで、色の微妙な変動をとらえるため、入力画像としては、マルチバンド画像を用いた。光の持つスペクトル分布を用いることで、経年変化による影響を考慮した色補正を行う。ここから、カラー画像を生成することで、杉戸絵の復元を行った。

1 はじめに

本報告で復元を行う対象としているのは、京都西本願寺の書院にて所蔵されている杉戸絵である。

経年変化によって、変色、退色を起している杉戸絵の色彩復元を行った。色彩復元には、マルチバンド画像を用いた。マルチバンド画像によって、物体表面からの反射光を色情報としてではなく、スペクトル情報として得ることができる。光の物理的な特徴量であるスペクトル情報をもとに、色彩復元を行う。最終的な復元画像は、マルチバンド画像から、太陽光下での観測を想定したカラー画像を生成することで実現した。

2 本願寺書院の杉戸絵

復元の対象とした西本願寺書院内の杉戸絵は、桃山時代の絵画である。これらは、歴史的な資料として保管されているが、特別な室内において保管されたり、展示されているのではない。書院が建造された当時と同じ場所に、当時と同じ配置で建物の構造の一部(戸)として現在も使用されている。そのため、撮影時に、被写体に対して手を加えたり、移動するなどして、特別な撮影環境を設定することはできなかった。従って、写真や絵画などの平面画像を未知の照明色下で撮像する場合に、スペクトルデータから2色性反射モデルを用い、物体の分光反射特性を推定し、色彩の復元を行う方法について報告する。

カラー画像の入力装置における色の再現性の評価と向上に関して、多くの研究がなされている。この研究は、色の計測性能の向上と、物体色の推定(反射モデルのパラメータの推定)の2つに分けて考えられる。人間の視覚における色の知覚は、3色性に基づいて知覚しているといわれ、カラー画像における色の計測は、赤、緑、青の色光の混色によって作

りだすことができるという仮定に基づいて行われる。色の計測という観点から、3色性に基づいた3つのイメージセンサーを使用する方式にとられず、3つ以上のセンサーを使用することによって測色性能を改善する方式が提案されている[1]。3つ以上のセンサーを用いるものとして、特定波長や広い幅を持った波長帯での計測を基にした、リモートセンシングで扱われるマルチスペクトル画像がある。さらに、連続的なスペクトルデータを測定点同士の位置関係とあわせて得ることで、材質的な違いも検出することができる[2][3][4]。カラー画像の入力から出力までをふまえたカラーマネージメントの基礎として、対象の色の分光反射特性を復元することは、非常に重要な項目となっている。カラー画像においてこれらを実現するためには、物体色の分光反射特性を主成分分析によって求められる低次の固有ベクトルで近似する方法が知られている[5][6][7]。対象の色を分光反射率をもって復元する際、画像が入力された環境と異なる照明下での再現色をえるためには、各画素の分光反射率(物体色)と光源の分光分布(光源色)の関係を考える必要がある。物体色の推定においては、光源色の影響を除去することが重要であり、色の恒常性の実現において必要不可欠である。光源色の推定結果から、物体色を推定する方法としては、2色性反射モデルに基づく方法と灰色仮説に基づく方法がある。一方は、光源と物体色の分光特性に3次元の直交基底関数の線形モデルを適用してこの問題を解決しようというものであり、誘電体における鏡面反射成分を用いた2色性反射モデル、基底関数による表現である[8][9][10]。他方は、物体の色の平均が灰色であると仮定する(灰色仮説)ことによって、反射光の平均の色を照明の色として推定する方法である[11]。さらに、肌や葉などの不均一な構造や、透明性を持つ物体のように、構造や構成色素の微妙な相異によって様々な色調を生じる対象もある。そのため、微妙な色調の違いを物理的に評価する研究が行われてきた[12][13][14][15]。

本報告では、以下の3点の影響を除去した復元を行うことで、当時の見た目に近い、鮮明な色彩の復元を目指す。画像入力として、マルチバンド画像を入力し、そこから得られるスペクトル情報から復元

Color Recovery of Wall and Screen Paintings using
Multi Band Image
by Masakazu IWANARI, Yoshihiro OKADA, and Kenji
MURAYAMA (Ryukoku University)

を行った上で、カラー画像を生成するアプローチをとった。色彩の復元によって、復元前には得られない印象を得ることが可能である。

光源の影響 各画素への入射光強度の不均一性の除去と鏡面反射の除去

色ムラ 変色、退色による色むらの除去

汚れ 経年変化によって変化した色の復元

上記の3項目を考慮して、対象物体の物体色を推定、一様な照明下で観測される画像を復元する。この目的のため、経年変化によって生じる色ムラと汚れなどの識別が可能なる入力系として、マルチバンド画像入力装置を用いている。マルチバンド画像では、対象物体が持つ分光的な情報を、空間的な分布情報と併せて画像として得ることができる。そのため、物体色の抽出が容易になる上、微妙な色変化をスペクトル組成の違いとして認識できる。

2.1 カラー画像生成過程

分光測色法 自然界の光は、ある単一の波長のみの光であることはありえない。通常は、いろいろな波長の光が混合した複合光である。したがって、3刺激値 R、G、B は、等色関数 $E(\lambda)$ を用いて、式(1)、(2)、(3)のように、各波長 λ の加重和として求めることができる。カラー画像などの入力に用いられる CCD カメラなどは、受光素子の応答感度をこの等色関数と同一に設定することで、色情報の取得を行っている。

$$R = \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$G = \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$B = \int_{380nm}^{780nm} E(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

ただし、 $E(\lambda)$ は光の分光分布であり、 $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ は、波長 λ でのスペクトル3刺激値(等色関数に相当する)である。以上のように、撮像系に入射する光のスペクトル分布から、等色関数に基づく積分操作(加重和)を行って入力光の3刺激値を求める方法を分光測色法とよぶ。通常使用するカラー画像の入力装置である CCD カメラは、その内部の CCD 素子の分光特性が、等色関数と一致するように設計することで、色情報を得ることができる。

画像中の対象物から反射して撮像系に、図1のように、本来は異なる一對の光が入射したとき、分光測色法によって求められた3刺激値の値の組合せが同じになることがある[1]。この等色を成立させている条件には様々なものが考えられる。例えば、照明光の分

光分布が変化すれば条件等色を成立させる条件がなくなり、もはや等色ではなくなる。このような、ある条件下では等色となる現象を条件等色 (metamerism) と呼ぶ。

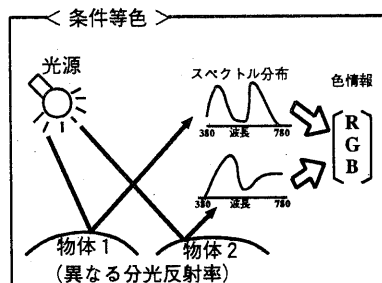


図 1: 条件等色

実際には異なるスペクトル分布をもつ色光に対しても同じ色として知覚する場合があり、スペクトル組成の違いまでは認識できない。このような、対象を構成する材質までを含めた、細かい色の違いを認識する方法として、光のスペクトル分布の利用が有効となる[3]。

3 マルチバンド画像

スペクトラム(波長)を幾つかの区間に分けて、それぞれのスペクトラムで画像を作りそれらの画像の組合せの中から有用な情報を導き出そうとする手法であり、狭い帯域(波長)で別々に測定すると分光放射特性の相違を利用して物体の識別ができる。この識別の能力はバンド数を増やすほど上げることができる[16][17]。

実験で用いるマルチバンド画像は、可視光域の区間を複数の帯域に分割し、また、それぞれの帯域に重なりが生じることがないようにしている。そのため、撮影される各バンド画像は、線スペクトル(単色光)と等価と仮定して扱うことができ、マルチスペクトル画像から得られる画素値は、入射光と同様の連続的なスペクトル分布を表しているとして解析を行うことができる。このマルチバンド画像から得られるスペクトル分布によって、物体の分光放射特性の違いを利用して物体の識別が可能となる。

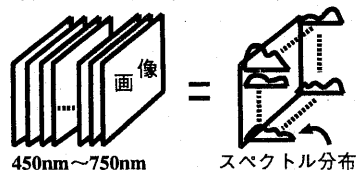


図 2: マルチスペクトル画像概念図

観測環境に左右されず、対象物のもつ真の色を推定することで、人間の視覚が持つ色の恒常性を実現することが可能となる。また、カラー画像においては、

測色的なアプローチによって校正をおこなったり、色の再現性の検証を行うことの基本となる。人間の視覚においては、未知の照明光での観測であっても、照明の色に影響されずに、物体の色を知覚することができる。これは、色の恒常性と言われ、たとえば、白色光源下でみた赤いリングを、青色の光源下であったも、紫ではなく赤色と知覚することが可能である。画像データにおいて、この色の恒常性を実現する方法として、照明の色に無関係な物体色、つまり、対象物の分光反射特性を推定することで実現できる。本報告では、この杉戸絵を本願寺書院内にて設置された状態で観測した場合と同様の色覚を与えるという意味で、太陽光下での見えを実現する。

3.1 撮像素子

マルチバンド画像を撮影するための狭帯域フィルタとして液晶チューナブルフィルタ (Liquid Crystal Tunable Filter)^[18] を用いた。LCTF を用いて、450nm から 750nm の範囲の可視光を 10nm 間隔で分割し、それぞれのバンドを 4096 階調 (12bit) の画像として撮影した。ここでは、LCTF の原理についての説明を行う。

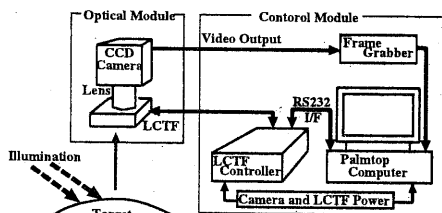


図 3: マルチバンド撮像素子

従来、対象物からの反射光の連続的なスペクトル情報を得るために、分光輝度計を用いて点単位の撮影を繰り返して 1 つの画像とする方法があるが、画像入力系としては、利便性の欠く方法であり、実用的ではない。本研究では、観測光の情報を連続的なスペクトル分布をもつ画像として得ることを目的としている。そのため、最低でも 450nm から 750nm の可視光域の波長域を、10nm 間隔程度で帯域の重なりがないように分割して、マルチバンド画像として撮影を行う。画像としてスペクトル情報を得るためには、異なる透過波長をもつ狭帯域フィルタを複数枚用いて撮影を行う必要がある。

狭帯域フィルタの代表としては、リオフィルター^[19]があるが、撮影する波長域をかえる場合には、異なる波長帯に透過域をもつ複数のフィルタを用いるか、リオフィルター内の複屈折フィルタの光学軸を機械的に回転する方法がとられている。しかし、これら 2 つの撮影方法も、異なる波長域を撮影する場合には、人手によるか、機械的な方法を取らなければならない、カラー画像と比較した場合、やはり、利便性のある入力装置とは言えなかった^[16]。マルチ

スペクトル画像の撮影を行う際に、液晶チューナブルフィルタ (LCTF: liquid crystal tunable filter) を用いて撮影を行った。この LCTF は、図 4 のように、リオフィルター内に液晶セル (LC 波長板) を組み込んだ数~数十段のカスケードステージで構成され、電気的な制御によって透過波長を自由に選択できる。このフィルタによって、マルチスペクトル画像入力系を容易に構成することができる (入力装置: 図 3)。

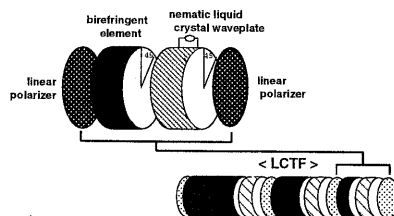


図 4: 液晶チューナブルフィルタ

このように、LCTF はリオフィルター内にネマチック液晶による波長板を組み込んだ数~10 数段のカスケードステージで構成される。そして、ネマチック液晶の電気制御複屈折効果 (Electrically Controlled Birefringence, ECB 効果) によって、透過光 (直線偏光) の直交する 2 成分の位相量を、電気的に制御することにより透過波長を自由に変えることのできる、狭帯域フィルタの形成が可能となる。この LCTF を CCD カメラに接続することで、450nm から 750nm の範囲の可視光を 30 個の帯域 (10nm 間隔) に分割し、それぞれの帯域ごとに撮影を行った。このようにして得られたマルチスペクトル画像では、撮像素子への入射光と同一の分光分布を、測定画像の画素値として得ることができる。

4 色彩復元

処理の手順は、以下の手順で行った。

1. 光源補正 拡散反射成分である物体色を推定
2. 色ムラ補正 特定の波長において観測される変化である色ムラを除去
3. 汚れの除去 スペクトル組成自体が大きく変化するような成分の変動を除去
4. 陰影の付加 対象の微妙な凹凸による質感や陰影を復元するため、輝度の情報を付加

4.1 分光反射分布の推定

2 色性反射モデル ハイライトを含めた物体表面での反射過程は、二色性反射モデル (Dichromatic reflection model)^{[20] [21]} を用いて表現できる。

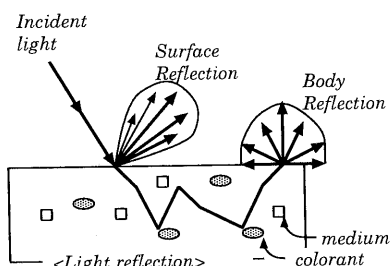


図 5: 二色性反射モデル

一般にプラスチックなどの表面は図5に示したような不均質な構造で近似できる。物体の表面で反射される際の反射光の経路を二つに別けて説明できる。すなわち、入射光の一部は物体表面と空気層の境界面で直ちに反射する。これは、表面反射と呼ばれ、鏡面反射モデルによって表現される。物体の表面で、直ちに反射され影響を受けないため、表面反射光の色は、光源色と一致する。

一方、内部反射とよばれる経路を通る反射光は、物体の内部において、散乱、吸収を繰り返したのち、反射する。この内部反射は、拡散反射に従うが、物体内の吸収特性の影響を受けるので、光源の色とは異なったスペクトル分布を示す。この際の、光の波長におけるそれぞれの吸収率の分布は、物体固有のものであり、その物体固有の色（物体色）を示す。

このように、物体表面の反射光 $L(\lambda, i, e, g)$ は、表面反射（光源色） $C_i(\lambda)$ と内部反射（物体色） $C_b(\lambda)$ の線形結合で表現できる。

$$L(\lambda, i, e, g) = m_i(i, e, g) \cdot C_i(\lambda) + m_b(i, e, g) \cdot C_b(\lambda) \quad (4)$$

ただし、 R は光の波長、 i は入射角、 e は反射角、 g は位相角、 m_i と m_b はそれぞれ表面反射成分、内部反射成分を表している。

このように、物体表面での光の反射は、2つの反射経路に別けることで、光源色と物体色の2つで表現できる。

光源の入射角制御からの反射成分の分離 マルチバンド画像撮影時において、光源の位置を変化させ、それぞれの位置で撮影を行った。このとき、カメラは固定したままであるので、各画素で観測される杉戸絵上の位置は変化しない。そのため、各画素において、光源の位置の変化によって得られる輝度値 $L(\lambda, i, e, g)$ の変動は、2色性反射で説明できる。つまり、光源の位置の変化によって、杉戸絵上の任意の位置では、光源光からの入射角 i が変化することになる。これにより、観測される物体色 $C_b(\lambda)$ 、光源色 $C_i(\lambda)$ は、それぞれの反射モデルである拡散反射、鏡面反射に従った変化をしめす。そのため、図6中のポイント A からポイント B までの光源位置の

変化に対して、それぞれの画素では、入射角の変化に応じた物体色、光源色の線形結合によって得られる変化を示す。

そのため、各画素内における輝度値の変化から、光源色と物体色の決定ができる。得られた物体色のベクトルの各波長に対する係数を、鏡面反射を除去した物体色を示し、かつ、明るさ方向の変化も除去した規格化されたスペクトルデータとして、以降の処理に用いる。

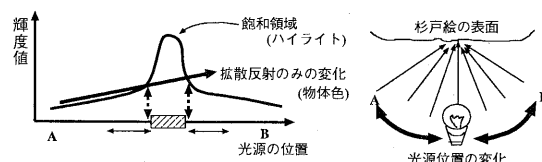


図 6: 拡散反射と鏡面反射

また、鏡面反射による直接反射 C_i の影響は、光源の位置による入射角 i と、物体の表面の法線ベクトル g の関係に依存する。図6のように、各画素における飽和部分の位置の違いが、その画素が観測する物体の表面の勾配をあらわしていることになる。飽和位置の違いをもとに、得られたスペクトルデータに対して、最終的な色補正を行った画像に対して、輝度値方向の変動を加える。これにより、杉戸絵の制作者が、構図として意図的に加えた陰影の情報も損なうことなく復元する（4.4節）。

4.2 変色成分の除去

光源の補正によって、コントラストに対して不変な物体色（分光反射特性）として、スペクトル分布を規格化した。色彩の復元を行う場合、画像中の同じ色材（絵具）で彩られた画素は、同じ物体色を持つ領域として表現されるべきである。実際には、色材を構成する物質が、経年変化や太陽光から紫外線を受ける。その結果、化学的な反応を起こし、色材を構成する物質のうちの一部分が消失するなどして、ある特定の波長域において反射特性が変化するので、色ムラや汚れのように、変色、退色を起こして観測される。

本来、復元時においては、復元の対象となる杉戸絵から、微量な色材を採取し化学分析をおこなったり、X線による計測などで、対象の材質までを特定すべきである。しかし、撮影時に、非破壊による検査であり、熱線による劣化なども防ぐため、使用する光源なども非常に限定された環境であった。そのため、対象の材質を特定することで物理的、光学的に正しい復元を行うのではなく、対象の特定を行わず、

コントラストの改善と色補正の枠組みの中で、当時の見えに近い、杉戸絵の鮮明な色彩を復元することを目的とした。

そこで、色ムラの影響を除去し、変色を起こす前の色に近い色で復元するために、以下の(1)-(3)手順をとった。

(1) サンプル領域の指定 杉戸絵に含まれる色数が限定されていることから、画像中からそれぞれの色の代表的な領域を、手作業にて指定した。(杉による背地の部分は、色の変化が大きいため、2つの色領域を指定した。)このとき、指定する領域は、汚れを含まない領域を指定するようにした。

(2) 各サンプル点からのクラスタリング 指定した各領域のそれぞれを、初期クラスタとして、クラスタリングを行った。この際、どのクラスタにも含まれない外れ値も存在するようにした(色ずれの大きい汚れを含む画素)。

(3) 各領域内での色変化を定量化 クラスタリングによって画像中に形成される、それぞれの領域領域において、色ずれの影響を定量化する。

対象の領域 f は、物体色と変色成分の M 個の物質で構成されると考えると、各物質のスペクトルによって張られる M 次の空間で表現できることになる。 p 個の変量 $z_1, z_2, \dots, z_p$ 間の相関を説明するため、 m 個の因子を考えて、次のようなモデルを想定する。

$$\begin{aligned} z_{1i} &= a_{11}f_{1i} + \dots + a_{1m}f_{mi} + e_{1i} \\ &\vdots \\ z_{pi} &= a_{p1}f_{1i} + \dots + a_{pm}f_{mi} + e_{pi} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 f_{ki} は、共通因子 f_k の個体 i の因子得点、 a_{jk} は、変量 z_j に因子 f_k がどれだけ反映するかを表す因子負荷量、 e_{ji} は変量 z_j 固有の変動を表す独自因子の得点を表す。

このモデルによって、物体色の変色を表現し、因子分析から得られる因子負荷量をもとに物体色を決定した。

4.3 汚れの分離

クラスタリングされなかった汚れを含む領域に対して、分類に使用するバンドを限定して、どの色をもつか決定する。この際、4.2 節の手順 3 によって決定された復元目的の物体色を利用する。撮影したマルチバンド画像は、可視光の帯域を 30 個の波長帯に分割し、それぞれを画像として入力したものである。この 30 バンドのうち、決定した物体色のそれぞれの識別に適した 3 個の波長帯 (バンド画像) を、

$$A = ([S]^t[S])^{-1} \quad (6)$$

によって求められる行列 A の対角要素の和を最小にする波長の組合わせを求めることで選択した [22]。

ただし、物体色のスペクトル分布を横に並べた行列を S とする。

前述の処理において、外れ値として分類された領域に対して、この選択した波長のみを使用してクラスタリングを行い、それぞれのクラスタに物体色を当てはめた。

4.4 陰影の付加

画像を、分光反射特性を基準に領域分割を行う。そして、分割されたそれぞれの領域内の各画素値を物体色へ変換することで、色ずれのない均質な領域としてカラー画像が生成できる。しかし、杉戸絵の表面にも微妙な凹凸による反射光量の変化がある。そのため、復元されたカラー画像も、杉戸絵が持つ質感を伝えるためには、陰影の変化を持たせる必要がある。物体表面からの反射光のうち、内部反射光は、拡散反射を示す物体色成分であり、表面反射光は、鏡面反射を示す光源色成分となる。そのため、内部反射光は、対象物体の色の変化、色ムラの情報が含まれている。そして、表面反射光は、その反射の性質から物体表面の凹凸をあらわす陰影情報が含まれている。

図 6 に示すように、光源が平行光であり、CCD 面と杉戸絵が平行に配置されている場合、任意の画素の輝度値の変動は、光源の位置の変化に依存する。鏡面反射が Phong モデルに従うならば、表面の法線ベクトルと光源からの入射角がなす角と観測方向と法線のなす角が等しくなるにつれ、反射光も強くなる。杉戸絵の全体と CCD 面がほぼ平行に位置するため、表面の微妙な勾配や凹凸の変化と、鏡面反射成分の変化が関連していることになる。そこで、光源の位置 (表面への入射角) の変化に対する輝度の変化を調べることで、各画素の陰影を復元できる。

色ムラが除去された画像に対して、鏡面反射成分に応じた重み付けを行った輝度情報を乗算することで、復元画像に陰影を加えた。

5 考察

図 7 が入力されたマルチバンドに処理を加えずに生成したカラー画像、図 8 が、復元した杉戸絵であり、杉戸の上に花車が描かれた構図になっている。図 14、図 15 が、杉戸絵を撮影したマルチバンド画像のうちの一部の領域、波長を表示したものである。撮影したマルチバンド画像から、スペクトル分布を用いて、領域単位の処理を行い、変色の除去を行った。そして、陰影情報を加えた上で、太陽光 (光源色と色温度) 下での観測を想定し、分光測色法によってカラー画像を生成した。復元された杉戸絵は、変色の影響が除去され、鮮明な色彩をもって復元が可能となった。今後は、対象に含まれる色材の推定を行い、様々な絵画に適用できる復元方法にする必要がある。



図 7: 原画像



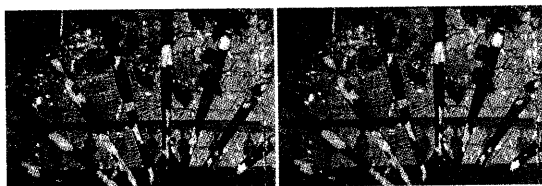
図 8: 復元画像



(a) 450nm

(b) 600nm

図 9: 杉戸絵のバンド画像 (一部)



(a) 600nm

(b) 720nm

図 10: 杉戸絵のバンド画像 (一部)

参考文献

- 1) 富永: カラー画像計測系を設計するための一般的条件とその適用, 信学論, Vol. J69-D, No. 11, pp. 1645-1653 (1986).
- 2) 真鍋, 佐藤, 井口: 連続スペクトル画像による物体認識についての考察, 画像の認識・理解シンポジウム, 1994, 7, I, 209-216.
- 3) 武田, 岡田: マルチスペクトルバンド画像を対象とした等色線処理, MIRU'96 (1996).
- 4) 富永: 色恒常性を実現するカメラ系とアルゴリズム, 信学技法, PRU95-11, pp. 77-84 (1995-05).
- 5) 田島: 分光反射データベースの開発, 画像電子第 21 回秋期セミナー, 08, pp. 0801-0805.
- 6) 田島: カラー画像入力装置に色再現評価用標準分光データベースの開発, 画像センシングシンポジウム, 第 4 回, pp. 219-224 (1998).
- 7) 嶋野: 物体色の低次ベクトル近似と復元-彩度による影響-, 画像電子学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 743-752 (1996).
- 8) 嶋野: 2 色性反射モデルを用いた画像からの分光反射分布の推定, 画像電子学会誌, Vol. 27, No. 4, pp. 380-388 (1998).
- 9) 富永: 色恒常性を実現するカメラ系とアルゴリズム, 信学技報, PRU-95-11, pp. 77-84, (1995-05).
- 10) 大田, 塚田, 林: 複数枚のカラー画像からの照明色と物体色の復元, 信学論, Vol. J76-A, No. 12, pp. 1778-1786 (1993).
- 11) 川村, 乾, 鈴木, 徳永: カラー画像における灰色仮説の適用条件と照明色推定, 信学論, Vol. J80-DII, No. 5, pp. 1046-1056 (1997-5).
- 12) 小島, 羽石, 三宅: 化粧肌の質感推定 (肌の凹凸の見えの定量化), 画像工学コンファレンス, 第 24 回, pp. 403-406 (1993).
- 13) C.L. Novak, S.A. Shafer: Method for estimating scene parameters from color histograms, J. opt. Soc. Am A, Vol. 11, pp. 3020-3036 (1994).
- 14) 津村, 羽石, 三宅: 肌の 2 次元分光反射率分布に対する独立成分分析, 画像センシングシンポジウム, 第 4 回, pp. 225-228 (1998).
- 15) 的崎, 武田, 木本, 池口: 画像中のつや情報の抽出-木の葉のケース-, 映像情報 (I), pp. 16-21 (1995-2).
- 16) 佐藤, 河合, 田村: CCD 撮像素子を用いたマルチスペクトル画像入力装置, 画像電子学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 112-120 (1985).
- 17) 谷水, 目黒: 分光特性を用いたカラー画像検査装置の信号補正, 画像電子学会誌, Vol. 21, No. 5, pp. 561-571 (1992).
- 18) 逸見登: VariSpec 液晶チューナブルフィルター, 光アライアンス, 1997, 7, pp. 49-52.
- 19) 光の鉛筆 (11), Lyot のフィルター O plus E, 1994-6, pp. 106-113.
- 20) G.J. Klinker, S.A. Shafer, T. Kanade: Image Segmentation and Reflection Analysis Through Color, Proc. of Image Understanding Workshop, pp. 838-853 (1991).
- 21) G.J. Klinker, S.A. Shafer, T. Kanade: Using a color reflection model to separate highlights from object color, 1st. ICCV, pp. 145-150 (1987).
- 22) 河田, 南: 科学計測のための画像データ処理, pp. 267, CQ 出版 (1997).