

# 光散乱を考慮した肌の分光反射率の非線形独立成分分析

津村 徳道・羽石 秀昭・三宅 洋一

千葉大学工学部情報画像工学科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

## Nonlinear Independent Component Analysis with Optical Scattering for Skin Reflectance Spectra

Norimichi TSUMURA, Hideaki HANEISHI and Yoichi MIYAKE

Department of Information and Image Sciences, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

It is found by Monte Carlo simulation that the optical scattering affects the independent component analysis of spectral image in human skin. We propose a new method to apply the independent component analysis to the spectral image with the non-linearity by optical scattering. The proposed method is confirmed by computer simulation.

### 1. はじめに

観測した画像を分析し、その画像を構成する物質を特定する定性情報や構成物質の空間的な分布を与える定量情報を抽出することが、医用診断、リモートセンシング<sup>1)</sup>、ロボットビジョン<sup>2)</sup>等で求められている<sup>3)</sup>。物質を特定する定性情報として、古くから機器分析で用いられてきた分光的特徴は非常に有効であり<sup>4)</sup>、観測画像として各画素における分光データを情報としてもつ分光画像を用いる手法(画像分光法)が提案されている<sup>3)</sup>。

独立成分分析を用いて混合物分光画像を分析する手法<sup>5,6)</sup>が近年注目されている。独立成分分析は、互いに独立な信号が混合した観測信号から、信号の独立性以外の先見的知識なしにもとの信号を抽出する手法である<sup>7-11)</sup>。多重音声分離、脳波データの解析、移動体通信における信号処理、画像の特徴抽出などへの応用が試みられている<sup>12)</sup>。筆者らは、混合物分光画像として人間の肌を対象とした場合に、ヘモグロビンとメラニンの色素分布を分離することに成功している<sup>13,14)</sup>。肌色は、カラーフィルムやカラーテレビにおける色再現系において最も重要な色として取り扱われ、近年のマルチメディア、コンピュータグラフィックス、遠隔医療などの急速な発展に伴い、ますます重要な色として認識されている。独立成分分析により肌色の構成色素やその空間分布などを得ることにより、医用診断を

はじめ多方面へ有用な情報を与えると期待されている。しかし、抽出された独立成分の分光的特徴をみた場合、それぞれ酸化ヘモグロビンとメラニンの吸光度分布の特徴に類似しているが、抽出されたメラニンの吸収特性において、酸化ヘモグロビンの吸収ピークの影響により、570 nm 付近の吸収が異常に減少している<sup>14)</sup>。このメラニン色素単独の吸収スペクトルにみられない吸収の減少が生じる原因として、2つの色素の空間的分布の従属性と、肌における光散乱の影響が考えられる。2つの色素の空間的分布の従属性が原因である場合は、色素が互いに独立に分布するとした独立成分分析の適用自体が今後の色素の抽出精度の改善における問題となる。

本研究では、光伝搬のモンテカルロ・シミュレーションにより計算した肌の分光反射率に対して独立成分分析を適用し、独立成分分析結果への光散乱の影響を解析した。また光散乱を考慮した独立成分分析法を新たに提案し、計算機シミュレーションによりその原理の有効性を確認した。2章、3章では、本研究で問題とするメラニン色素単独の吸収スペクトルにみられない吸収ピークについて説明するために、文献<sup>13-15)</sup>に従って、独立成分分析による混合物画像の分離法、肌分光画像の独立成分分析とその結果を簡単に説明し、そのとき生じたメラニン色素単独の吸収スペクトルにみられない吸収の減少を示す。4章において、光伝搬のモンテカルロ・シミュレーションにより肌の分光反射率を計算し、計算された複数の分光反射率に対して独立

E-mail: tsumura@ics.tj.chiba-u.ac.jp

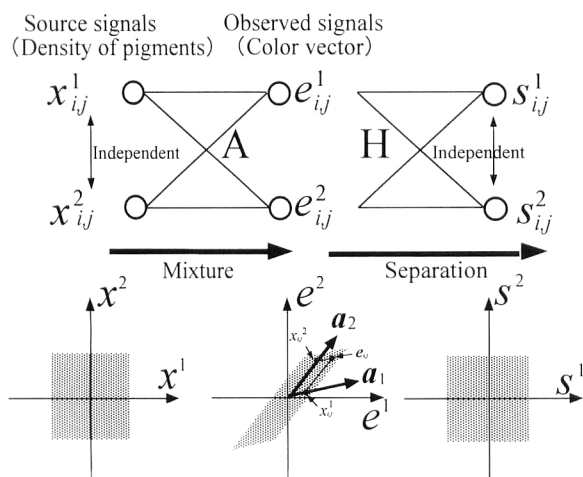


Fig. 1 Mixture and separation of independent signals.

成分分析を行う。また、光散乱を考慮した独立成分分析法を新たに提案する。

## 2. 独立成分分析による混合物画像の分離法<sup>5,6)</sup>

独立成分分析は、互いに独立な信号が混合した観測信号から、信号の独立性以外の先見的知識なしに、もとの信号を抽出する手法である。混合物画像の各画素  $(i, j)$  において、各チャンネルの値をまとめて色ベクトル  $e_{ij}$  で、混合される色素の各含有量をまとめて成分ベクトル  $x_{ij}$  で表す。このとき、変換行列  $A$  を用いて式 (1) の関係が成り立つと仮定する。

$$e_{ij} = Ax_{ij} \quad (1)$$

また、成分ベクトル  $x_{ij}$  の各要素 (含有量) が位置  $(i, j)$  に関して互いに独立であると仮定する。Fig. 1 に、2 成分 2 チャンネルの場合の例を用いた信号の流れを示す。同時に、それぞれの信号のもつ確率密度分布の例を示す。図に示すように、成分ベクトル  $x_{ij}$  の各成分は互いに独立であるが、変換行列  $A$  による混合により、互いに相関のある成分をもつ色ベクトル  $e_{ij}$  が観測されることがわかる。このとき、変換行列  $A$  を構成する基底ベクトル  $a_1, a_2$  はそれぞれの色素のもつ色ベクトルである。われわれの観測することができる信号は観測色ベクトル  $e_{ij}$  のみであり、ベクトル  $x_{ij}$  の各要素 (含有量) が位置  $(i, j)$  に関して互いに独立であるという条件のみから、独立成分分析により基底ベクトル  $a_1, a_2$ 、成分ベクトル  $x_{ij}$  の相対値を推定する。

Fig. 1 に示すように変換行列  $H$  により線形変換された信号ベクトル  $s_{ij}$  を考える。

$$s_{ij} = He_{ij} \quad (2)$$

ベクトル  $s_{ij}$  の各要素が互いに独立となるような行列  $H$

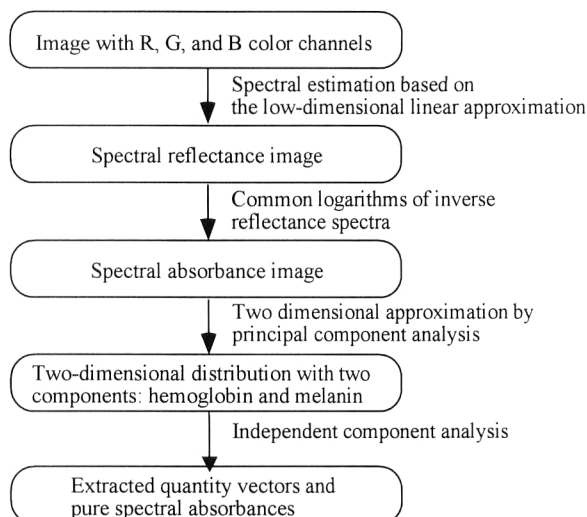


Fig. 2 Flowchart for the analysis of the human skin image.

を  $e_{ij}$  から求めることにより、得られた  $H$  の逆行列から  $A$  を構成する基底ベクトル  $a_1, a_2$  の方向を推定できる。すなわち、各成分単独の色ベクトルの方向が推定できる。また、これより各画素における色素の含有量の相対値が推定できる。

ベクトル  $s_{ij}$  の各要素が互いに独立となるような行列  $H$  をみつける手法として、ニューラルネットワークの学習を利用した手法<sup>7,8,10)</sup> や固定点法等の最適化法を用いた手法<sup>9)</sup> 等が提案されている。本論文では、Burel の提案する独立性評価関数<sup>8)</sup> を用いて、その準ニュートン法<sup>16)</sup> による最適化により、最適な行列  $H$  をみつける。独立性評価関数では、高次のモーメントを考慮することにより変数の独立性を評価することができる。

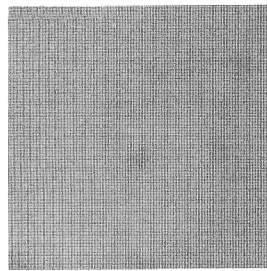
独立成分分析により抽出されたベクトル  $s_{ij}$  の各成分を入れ換えたり、定数倍しても、信号の独立性は保たれることから、抽出された信号は、独立信号源に対して可換的 (本論文では、成分の入れ換えを意味する) であり相対的であるといえる。

## 3. 肌分光画像の独立成分分析

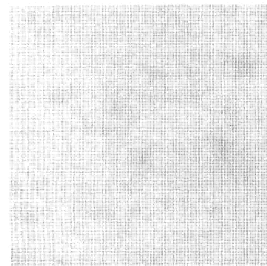
HDTV (high definition TV) カメラで撮影された顔画像の額の部分から  $64 \times 64$  画素で切り出した RGB 肌画像を用いて肌色の分析を行い、メラニン成分とヘモグロビン成分の分離に成功している<sup>13-15)</sup>。Fig. 2 に分析の手順を示す。Fig. 3(a) に、対象とする RGB 肌画像を示す。また、Fig. 4 に Fig. 2 の手順に従った信号の変換結果を示す。

### 3.1 肌分光画像と肌色のモデル化

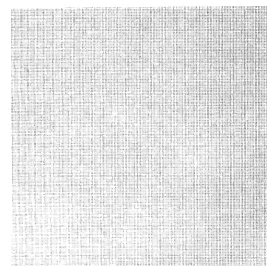
Fig. 3(a) に示す RGB 肌画像の各画素の RGB 値から低次元線形近似法<sup>17-19)</sup> により分光反射率を推定する。こ



(a)



(b)

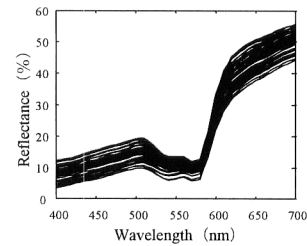


(c)

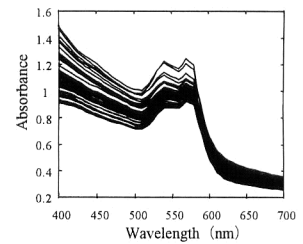
Fig. 3 Separation of skin image. (a) Skin color image with  $64 \times 64$  pixels, images of color densities for the (b) first and (c) second independent components.

ここで、分光反射率は画像の全画素においてそれぞれ推定されるため、分光反射率画像が得られる。推定された分光反射率画像の中から 100 点をランダムに抽出し、Fig. 4(a) に示す。

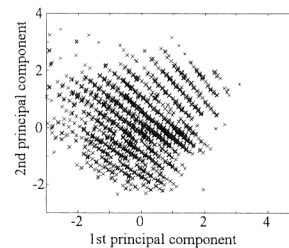
分光反射率の逆数の常用対数値である分光反射濃度と色素の含有量の間に式 (1) に示す線形な関係が存在すると仮定する。すなわち、各色素単独の色ベクトルと複数の色素が混合した際の色ベクトルとの間に Lambert-Beer の法則が成り立つと仮定する。Fig. 4(b) に Fig. 4(a) に示す分光反射率を分光反射濃度に変換した結果を示す。ここでさらに、肌色の空間的な変化は、主にヘモグロビン色素とメラニン色素によると仮定すると、肌色は Fig. 5 に示すように簡単にモデル化できる。Fig. 5 において、すべての波長成分の張るベクトル空間を表すことが困難であるため、3 つの波長成分のみで構成される 3 次元ベクトル空間で表した。図に示すように、肌色はカロチン等で合成されるベースの色と空間的に変化するヘモグロビンの色とメラ



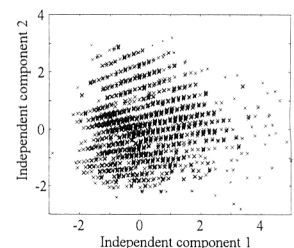
(a) Estimated skin spectral reflectance



(b) Estimated skin spectral absorbance



(c) Principal components



(d) Independent components

Fig. 4 The obtained data in independent component analysis of spectral image in human skin.

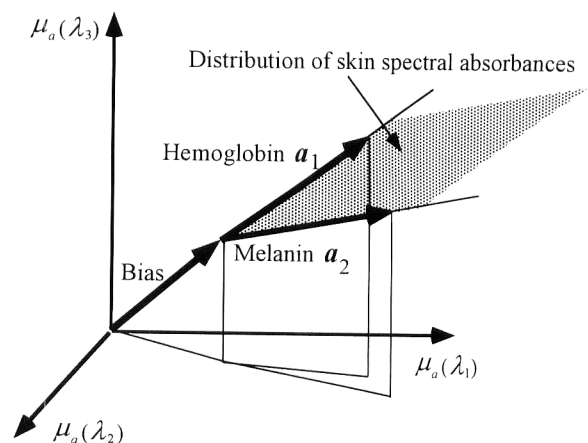


Fig. 5 Model of spectral absorbance in human skin.

ニンの色の合成ベクトルで表される。空間的に変化するの、ヘモグロビンの色とメラニンの色だけであるため、すべての波長成分の張るベクトル空間の中で肌色は 2 次元平面内に分布する。そこで、Fig. 4(b) に示される分光反射濃度の主成分分析により得られる第 1 主成分と第 2 主成分の張る 2 次元ベクトル空間のみを用いてこの後の処理を行うことにする。第 1 主成分と第 2 主成分の張る 2 次元ベクトル空間のみに限定する近似を 2 成分近似とよぶ。第 2 主成分までを用いた近似精度は約 98% であった。Fig. 4(c) に 2 成分の分布を示す。横軸は第 1 主成分、縦軸は第 2 主成分の軸を示す。

### 3.2 独立成分分析の結果

ヘモグロビンとメラニンは空間的に独立に分布している

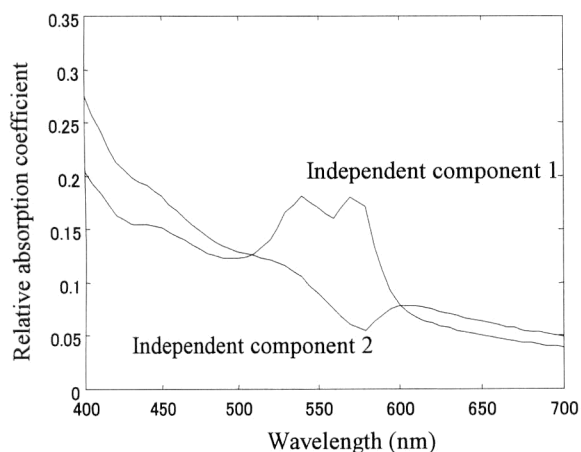


Fig. 6 Relative spectral absorption coefficient extracted by independent component analysis of skin image.

と仮定した場合、2章に述べたように第1主成分と第2主成分を要素にもつ色ベクトルから、独立成分分析により各色素単独の色ベクトルの方向が推定できる。Fig. 4(d)に、独立成分分析の結果得られた $2 \times 2$ の変換行列 $H$ によりFig. 4(c)の分布を変換した結果を示す。変換行列 $H$ の各要素は、ベクトル $s_{ij}$ の各要素 $s_{ij}^1$   $s_{ij}^2$ に対するBurelの独立性評価関数<sup>8)</sup>の準ニュートン法<sup>16)</sup>による最小化により求める。このとき、変換行列 $H$ の基底はつねに1に規格化したものを用いる。Fig. 4(c) (d)の分布に対する独立性評価値はそれぞれ、0.2414, 0.0073であった。これにより、ベクトル $s_{ij}$ の各要素 $s_{ij}^1$   $s_{ij}^2$ は互いにかなりの独立性をもつため、ヘモグロビンとメラニンは空間的に独立に分布するとする仮定がほぼ正しいことがわかった。

Fig. 3(b) (c)に、分離された独立成分1のみの画像、独立成分2のみの画像をそれぞれ示す。独立成分1の画像にのみニキビが表れていることから、独立成分1はヘモグロビン、独立成分2はメラニンと思われる。Fig. 6に各独立成分の分光吸収特性を示す。また、Fig. 7に酸化ヘモグロビン色素とメラニン色素単独の吸収特性を溶媒に溶かして計測された結果<sup>20)</sup>を示す。ヘモグロビン色素と思われる独立成分1に酸化ヘモグロビン色素に類似した2つの吸収が表れている。またメラニン色素と思われる独立成分2は、400 nm から 700 nm にかけて単調に減少するメラニン色素特有の吸収特性を示している。

Fig. 6 に示されたように、抽出されたメラニンの吸収特性において、酸化ヘモグロビンの吸収ピークの影響により570 nm 付近の吸収が異常に減少している。この原因として、2つの色素の空間的分布の従属性と、肌における光散乱の影響が考えられる。2つの色素の空間的分布の従属性が原因である場合は、色素が互いに独立に分布するとした

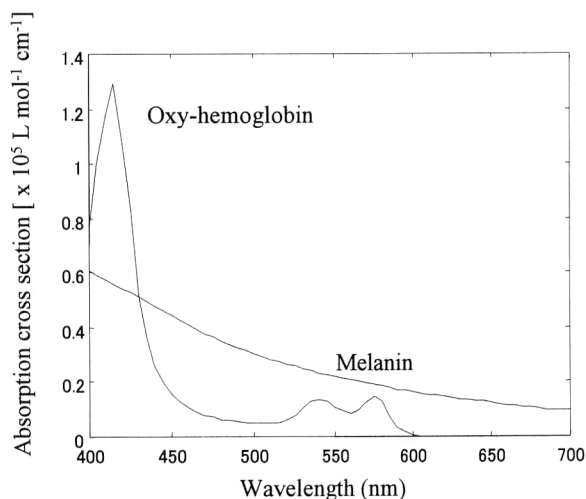


Fig. 7 Spectral absorbance of oxy-hemoglobin and melanin<sup>20)</sup>.

独立成分分析の適用自体が今後の分離精度の改善における問題となる。次章において、肌における光散乱の影響により、Fig. 6 と同様に 570 nm 付近の吸収が異常に減少することを示す。

#### 4. 光の散乱と肌の独立成分分析

##### 4.1 肌における光伝搬のモンテカルロ・シミュレーション

皮膚は、主に皮脂膜、表皮、真皮、皮下脂肪からなる層構造をしている。本研究では、簡単化のためにメラニン色素が含まれる表皮と、酸化ヘモグロビン色素が含まれる真皮のみから構成されるとした。表皮の厚さは0.0065 cm、真皮の厚さは0.3 cmとした。両層の屈折率はともに1.4とした<sup>21)</sup>。また、Fig. 8に今回用いた表皮と真皮の散乱係数 $\mu_s$ <sup>21)</sup>、非等方散乱パラメーター $g$ <sup>21)</sup>を示す。ここで、表皮と真皮の散乱係数は等しいと仮定した。メラニンと酸化ヘモグロビンの1モル当たりの吸収断面積は、Fig. 7に示したものをを用いた<sup>20)</sup>。各色素の成分量を独立にそれぞれ均等な間隔で7段階変化させて、49個の肌の分光反射率を、文献<sup>22)</sup>にあるモンテカルロ・シミュレーションにより生成した。光散乱のモンテカルロ・シミュレーションは、与えられた散乱係数、吸収係数などにに基づき、確率的に光子の運動を追跡する手法である。今回、1波長における反射率を得るのに、100万個のフォトン群を用いた。メラニンの色素量は、88~112 mol/Lの範囲で変化させ、ヘモグロビンは22~118 mol/Lの範囲で変化させた。Fig. 9に計算機で生成された分光反射率の一部を示す。これらは実測された分光反射率に類似している。

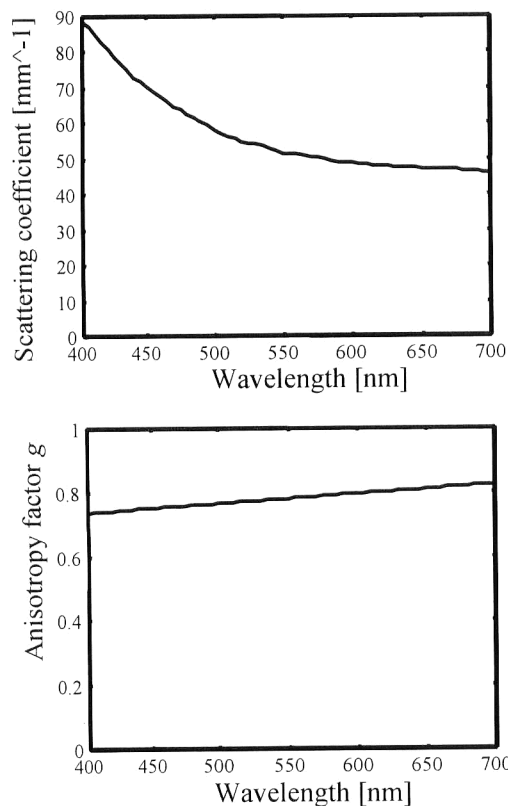


Fig. 8 Scattering coefficient and anisotropy factor in epidermis and dermis layer<sup>21)</sup>.

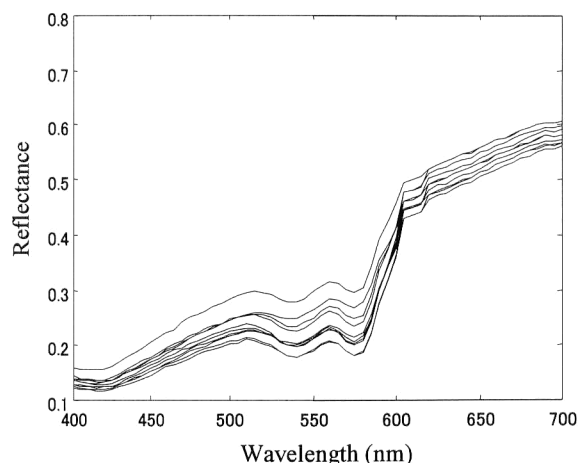


Fig. 9 Examples of simulated skin spectral reflectance.

#### 4.2 計算機で生成された分光反射率の独立成分分析と光散乱の影響

計算機で生成された 49 個の分光反射率に対して、これまでと同様に独立成分分析を行った。Fig. 10 に抽出された独立成分、Fig. 11 に得られた相対的な成分量の分布を示す。Fig. 10 においても Fig. 6 と同様に、抽出されたメラニンの吸収特性に、酸化ヘモグロビンの吸収ピークの影響

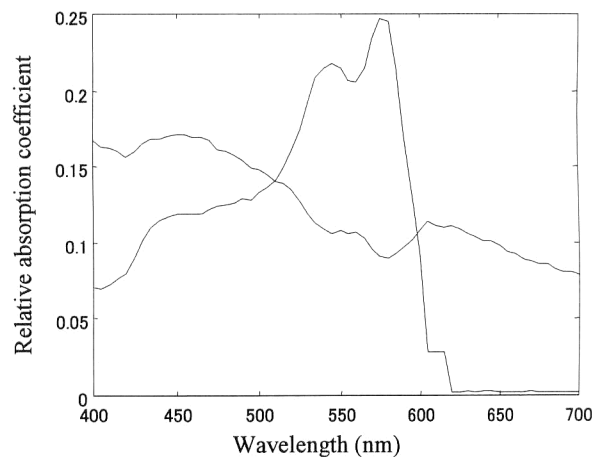


Fig. 10 Relative spectral absorption coefficient extracted by independent component analysis of simulated skin spectral reflectance.

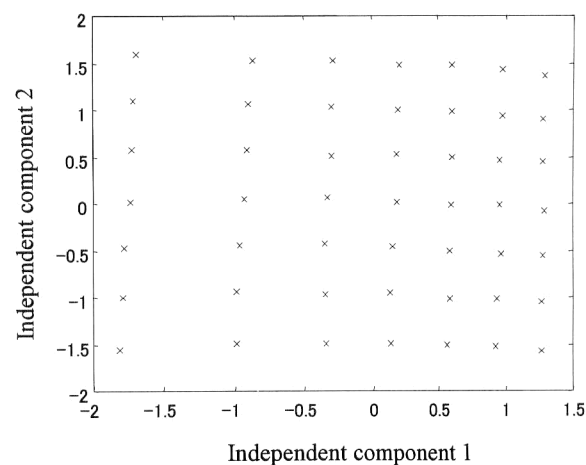


Fig. 11 Extracted densities of independent components.

が生じている。また、等間隔に変化させて与えた成分量が、独立成分分析により得られた Fig. 11 においては等間隔ではない。これらの結果は、正確に分離可能な式 (1) に示す線形混合の場合と比較して、混合における非線形性のみが異なることから、その非線形性に原因があると考えることができる。この非線形性は、光の散乱によりさまざまな長さの光路長が混在するため、独立成分分析の際に仮定した吸収スペクトルと肌の分光濃度の間の線形性 (Lambert-Beer の法則) が保たれていないことによる。したがって、Fig. 6 のメラニンの吸収特性に表れるピークも、光散乱による非線形性の影響である可能性が大きい。

#### 4.3 光散乱を考慮した独立成分分析法

光散乱の影響による肌の分光濃度と色素単独の吸収スペクトルの間の非線形性が既知である場合に、線形な場合と同様に適用可能である非線形な独立成分分析を提案し、計

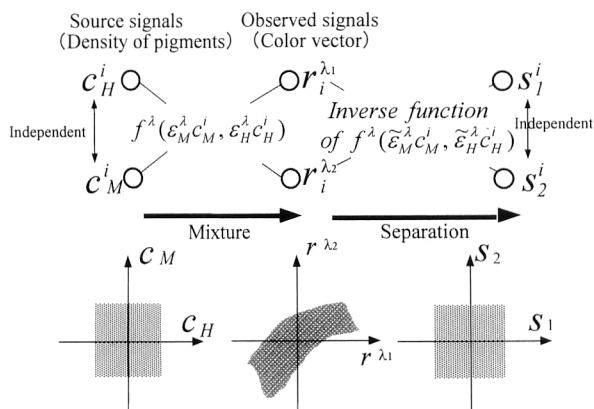


Fig. 12 Mixture and separation of independent signals with known non-linear function.

算機シミュレーションによりその有効性を示す。波長  $\lambda$  におけるメラニン、ヘモグロビンの 1 モル当たりの吸収断面積 ( $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ) をそれぞれ  $\epsilon_M^\lambda$ ,  $\epsilon_H^\lambda$  とする。また、分光反射率サンプル  $i$  におけるメラニン、ヘモグロビンの濃度 (数密度)  $[\text{mol L}^{-1}]$  をそれぞれ  $c_M^i$ ,  $c_H^i$  とする。サンプルの総数を  $N$  とする。このとき、サンプル  $i$  の波長  $\lambda$  における反射率  $r_i^\lambda$  は次式で表されるとする。

$$r_i^\lambda = f^\lambda(\epsilon_M^\lambda c_M^i, \epsilon_H^\lambda c_H^i) \quad (3)$$

関数  $f^\lambda(\quad)$  は、波長  $\lambda$  における光の散乱特性が考慮された非線形関数であり、吸収断面積  $\epsilon_M^\lambda$ ,  $\epsilon_H^\lambda$  と色素の濃度  $c_M^i$ ,  $c_H^i$  を与えた場合、4 章 1 節で述べたモンテカルロ・シミュレーションにより関数の値  $r_i^\lambda$  を得ることができる。

式 (3) に示すように光散乱による非線形性が既知である場合、2 成分 2 チャネル (2 波長  $\lambda_1, \lambda_2$ ) の非線形混合における信号の流れを Fig. 1 と同様に Fig. 12 に示す。独立信号源であると仮定する色素の濃度  $c_M^i$ ,  $c_H^i$  が、光散乱による非線形関数と吸収断面積  $\epsilon_M^\lambda$ ,  $\epsilon_H^\lambda$  により混合されることにより、分光反射率  $r_i^{\lambda_1}$ ,  $r_i^{\lambda_2}$  が得られる。

Fig. 12 において、混合時の非線形関数  $f^\lambda(\quad)$  と観測された信号  $r_i^{\lambda_1}$ ,  $r_i^{\lambda_2}$  のみが既知であり、吸収断面積  $\epsilon_M^\lambda$ ,  $\epsilon_H^\lambda$  と、独立信号源であると仮定する色素の濃度  $c_M^i$ ,  $c_H^i$  は未知である。本論文で提案する手法では、式 (2) と同様に観測された信号  $r_i^{\lambda_1}$ ,  $r_i^{\lambda_2}$  から、Fig. 12 に示すように変換行列  $\mathbf{H}$  に対応する  $\tilde{\epsilon}_M^\lambda$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^\lambda$  を与えて、信号  $s_1^i$ ,  $s_2^i$  を抽出する。このとき、式 (2) のような簡単な線形分離では非線形の混合の場合に問題が生じることを前章までで述べた。そこで、2 波長  $\lambda_1, \lambda_2$  に関する吸収係数  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_2}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_2}$  を与えた場合、式 (3) から得られる 2 波長  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  に関する 2 つの非線形連立方程式を準ニュートン法<sup>16)</sup>を用いて数値計算により解き、 $r_i^{\lambda_1}$ ,  $r_i^{\lambda_2}$  から信号  $s_1^i$ ,  $s_2^i$  を得ることにより、混合の非線形性を考慮した分離を行う。

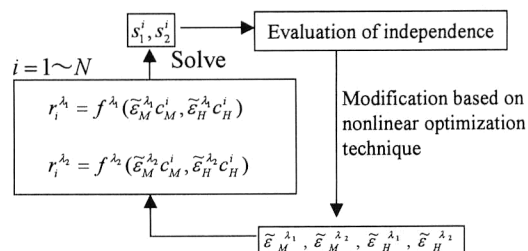


Fig. 13 Iterative method for extraction of independent component from non-linear mixture.

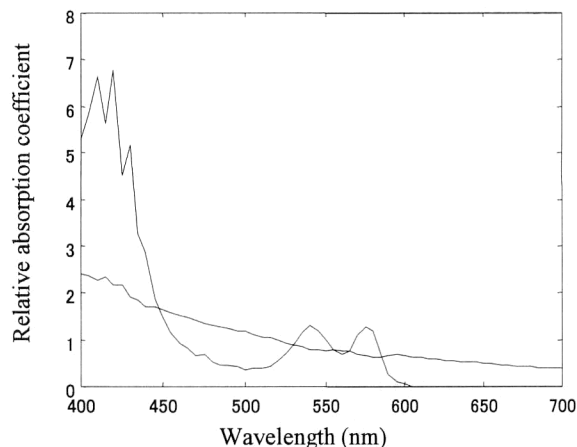


Fig. 14 Relative spectral absorption coefficient extracted by proposed independent component analysis of simulated skin spectral reflectance.

提案する関数  $f^\lambda(\quad)$  の非線形性を考慮した独立成分分析は、線形な場合と同様に、Fig. 13 に示すように初期値として適当な値を  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_2}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_2}$  に与え、非線形連立方程式を解いて得られる信号  $s_1^i$ ,  $s_2^i$  が互いに独立となるように Burel の独立性評価関数<sup>8)</sup>を用いて準ニュートン法<sup>16)</sup>により吸収係数  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_2}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_2}$  の値を繰り返し修正することにより行う。このとき、線形混合と同様に、提案する独立成分分析により抽出された信号  $s_1^i$ ,  $s_2^i$  と、吸収断面積  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_2}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_2}$  は、独立信号源である濃度  $c_M^i$ ,  $c_H^i$  と混合時の吸収断面積  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_M^{\lambda_2}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_1}$ ,  $\tilde{\epsilon}_H^{\lambda_2}$  に対して、可換的かつ相対的な値である。

提案する独立成分分析により 2 波長の反射率から相対的な濃度  $c_M^i$ ,  $c_H^i$  が決定されることから、式 (3) から各波長において  $\epsilon_M^\lambda$ ,  $\epsilon_H^\lambda$  を未知パラメーターとする  $N$  個の連立方程式が得られる。 $N$  はサンプル数を表す。この 2 変数に対する非線形の連立方程式を、準ニュートン法<sup>16)</sup>を用いて数値計算により解き、 $\lambda_1, \lambda_2$  以外の各波長の相対的な吸収係数  $\epsilon_M^\lambda$ ,  $\epsilon_H^\lambda$  を得る。

本研究では、2 波長  $\lambda_1, \lambda_2$  として 550 nm, 600 nm を、分析対象として計算機で生成された分光反射率から 2 成分

が独立な9個を選んだ。提案する方法で抽出された吸収特性をFig. 14に示す。モンテカルロ法における統計的なばらつきの影響を受けているが、Fig. 7に示すオリジナルの吸収係数を良好に抽出している。

## 5. まとめと考察

肌分光画像の独立成分分析により抽出されたメラニン色素の570 nm付近の吸収の異常な減少が、光散乱によるモデルの非線形が原因のひとつであることが、光伝搬のモンテカルロ・シミュレーションを行って得た計算によりわかった。さらに、問題となる光散乱による非線形性を考慮した新たな独立成分分析法を提案し、計算機シミュレーションによりその有効性を確認した。これまでのところ、実測した分光反射率に対しては、提案する独立成分分析法では妥当な解に収束しない。この原因として肌のモデル化誤差や解の不安定性等が考えられるので、今後、数値計算法の改良、肌の各層の厚さや散乱係数の特定、誤差の影響を受けにくい最適な波長選択により、計算時間の短縮、局所解の回避、分離精度向上を行う必要がある。今回提案する非線形独立成分分析は、肌の各層の厚さや散乱係数などを既知とする場合であるが、それらが未知の場合、すなわち光散乱の非線形性が未知の場合、ニューラルネットワークの非線形な学習能力を利用した非線形混合信号に対する独立成分分析法<sup>8)</sup>の適用も今後検討するべきである。

本研究の光散乱とそのモンテカルロ・シミュレーションに関して、有益なご助言をいただき、またかずかずの議論をさせていただいたオリンパス光学工業(株)の後野和弘氏に心より感謝いたします。また、貴重なコメントをいただいた査読者に心より感謝いたします。

## 文 献

- 高木幹雄, 下田陽久監修: 画像解析ハンドブック (東京大学出版会, 1991).
- 真鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士: “物体認識のためのスペクトル画像による材質の判別”, 電子情報通信学会論文誌, **J79-D-II** (1996) 36-44.
- 河田 聡, 南 茂夫編著: 科学計測のための画像データ処理 (CQ 出版, 1994).
- 南 茂夫, 合志陽一編: 分光技術ハンドブック (朝倉書店, 1990).
- 井上 卓, 藤井勇作, 伊東一良, 一岡芳樹: “多次元少数要素独立成分分析法”, 光学連合シンポジウム東京 '95 講演予稿集 (1995) pp. 105-106.
- 白崎宏一, 井上 卓, 伊東一良, 一岡芳樹: “2段階独立成分分析の混合画像分離への応用”, 光学, **25** (1996) 537-543.
- C. Jutten and J. Hérault: “Blind separation of sources, Part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture,” *Signal Process.*, **24** (1991) 1-10.
- G. Burel: “Blind separation of sources: A nonlinear neural algorithm,” *Neural Networks*, **5** (1992) 937-947.
- A. Hyvöinen and E. Oja: “A fast fixed-point algorithm for independent component analysis,” *Neural Computation*, **9** (1997) 1483-1492.
- J. Karhunen, E. Oja, L. Wang, R. Vigário and J. Joutsalo: “A class of neural networks for independent component analysis,” *IEEE Trans. Neural Network*, **8** (1997) 486-504.
- 甘利俊一: “独立成分分析とは”, (連載 独立成分分析 第1回) *Comput. Today*, No. 87 (1998) 38-43.
- J. Karhunen, A. Hyvärinen, R. Vigário, J. Hurri and E. Oja: “Applications of neural blind separation to signal and image processing,” *Proc. IEEE*, **1** (1997) 131-134.
- N. Tsumura, H. Haneishi and Y. Miyake: “Independent component analysis of skin color image,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 2169-2176.
- N. Tsumura, H. Haneishi and Y. Miyake: “Independent component analysis of spectral absorbance image in human skin,” *Opt. Rev.*, **7** (2000) 479-482.
- 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: “独立成分分析を用いた混合物画像の分析法—肌分光画像からのヘモグロビンとメラニンの抽出”, 画像ラボ, **10**, No. 2 (1999) 1-4.
- ASNOP 研究会編集: 非線形最適化プログラミング (日刊工業新聞社, 1991).
- 小島伸俊, 羽石秀昭, 三宅洋一: “化粧肌の質感推定(III) HDTV カメラ画像からの肌の分光反射率の推定”, 日本写真学会誌, **57** (1994) 78-83.
- M. J. Vrhel and H. J. Trussell: “Color correction using principal components,” *Color Res. Appl.*, **17** (1992) 328-338.
- 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: “重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定”, 光学, **27** (1998) 384-391.
- R. R. Anderson and J. A. Parrish: “The optics in human skin,” *J. Invest. Dermatol.*, **77** (1981) 13-19.
- M. J. C. V. Gemert, S. L. Jacques and H. J. C. M. Sterenborg: “Skin optics,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **36** (1989) 1146-1154.
- L. -H. Wang, S. L. Jacques and L. -Q. Zheng: “MCML—Monte Carlo modeling of photon transport in multi-layered tissues,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, **47** (1995) 131-146.