

)

)

)

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)

(Received)))))) ;) Accepted))))))))))

)

)

)

)

)

英文要旨)

)

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.)

)

)

)

)

)

日本文要旨)

)

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吸収特性において 570nm 付近の吸収が異常に減少している．本論文では，光散乱による肌色モデルの非線形がこの減少の原因の一つであることを，光散乱のモンテカルロシミュレーションにより得た分光反射率の解析により示した．また，光散乱による肌色モデルの非線形を考慮した独立成分分析法を新たに提案し，色素の吸収特性を効率よく抽出できることを計算機シミュレーションにより示した．)

)

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¹⁾、ロボットビジョン²⁾等で求められている³⁾。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⁴⁾、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持つ分光画像を用いる手法（画像分光法）が提案されている³⁾。)

) 独立成分分析を用いて混合物分光画像を分析する手法^{5,6)}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元の信号を抽出する手法である⁷⁻¹¹⁾。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¹²⁾。我々は、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^{13,14)}。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

フックス，遠隔医療などの急速な発展に伴い，肌色は益々重要な色として認識されている．独立成分分析により肌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見た場合，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，570nm 付近の吸収が異常に減少している¹⁴⁾．このメラニン色素単独の吸収スペクトルに見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節，3節では，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見られない吸収ピークについて説明するために，参考文献^{13,14,15)}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，その時生じたメラニン色素単独の吸収スペクトルに見られない吸収の減少を示す．4節において，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^{5,6)}

) 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，各チャネルの値をまとめて色ベクトル $\mathbf{e}_{ij}$ で，混合される色素の各含有量をまとめて成分ベクトル $\mathbf{x}_{ij}$ で表す．この時，変換行列 $\mathbf{A}$ を用いて式(1)の関係が成り立つと仮定する．)

)

$$\mathbf{e}_{ij} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{ij} \quad (1)$$

)

また，成分ベクトル $\mathbf{x}_{ij}$ 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． Figure) 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，それぞれの信号の持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 $\mathbf{x}_{ij}$ の各成分は互いに独立であるが，変換行列 $\mathbf{A}$ による混合により，互いに相関のある成分を持つ色ベクトル $\mathbf{e}_{ij}$ が観測されることが分かる．この時，変換行列 $\mathbf{A}$ を構成する基底ベクトル $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ はそれぞれの色素の持つ色ベクトルである．我々の観測することが出来る信号は観測色ベクトル $\mathbf{e}_{ij}$ のみであり，ベクトル $\mathbf{x}_{ij}$ 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 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ ，成分ベクトル $\mathbf{x}_{ij}$ の相対値を推定する．)

) Figure) 1 に示すように変換行列 $\mathbf{H}$ により線形変換された信号ベクトル $\mathbf{s}_{ij}$ を考える．)

)

$$\mathbf{s}_{ij} = \mathbf{H}\mathbf{e}_{ij} \quad (2)$$

)

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

を $\mathbf{e}_{ij}$ から求めることにより，得られた $\mathbf{H}$ の逆行列から

$\mathbf{A}$ を構成する基底ベクトル $\mathbf{a}_1$ ， $\mathbf{a}_2$ 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 $\mathbf{s}_{ij}$ の各要素が互いに独立となるような行列

$\mathbf{H}$ を見つける手法として，ニューラルネットワークの学習を利用した手法^{7,8,10)}や固定点法等の最適化法を用いた手法⁹⁾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⁸⁾を用いて，その準ニュートン法²¹⁾による最適化により，最適な行列 $\mathbf{H}$ を見つける．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出来る．)

) 独立成分分析により抽出されたベクトル $\mathbf{s}_{ij}$ の各成分

を入れ替えたり，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 カメラで撮影された顔画像の額の部分から 64×64 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¹³⁻¹⁵⁾。Figure) 2 に分析の手順を示す。Figure) 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)

) Figure) 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¹⁸⁻²⁰⁾により分光反射率を推定する。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。) Figure)

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．Figure 5において，全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は，ヘモグロビンの色とメラニンの色だけであるため，全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成分近似と呼ぶ．第2主成分までを用いた近似精度は約98%であった．Figure 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主成分を要素に持つ色ベクトルから，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．Figure) 4(d)に，独立成分分析の結果得られた 2×2 の変換行列 H により Figure) 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⁸⁾の準ニュートン法²¹⁾による最小化により求める．この時，変換行列 H の基底は常に1に規格化したものを用いる．Figure) 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 は互いにかかなりの独立性を持つため，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分かった．)

Figure) 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．Figure) 6に各独立成分の分光吸収特性を示す．また，Figure) 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¹⁷⁾をしめす。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、400nmから700nm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。)

) Figure) 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 570nm 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。次節において、肌における光散乱の影響により、Figure) 6 と同様に 570nm 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たとした．表皮の厚さは 0.0065cm，真皮の厚さは 0.3cm とした．両層の屈折率とともに 1.4 とした¹⁶⁾．また，Fig.8 に今回用いた表皮と真皮の散乱係数 μ_s ¹⁶⁾，非等方散乱パラメータ g ¹⁶⁾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.17 に示したものを¹⁷⁾用いた．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，参考文献²²⁾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，吸収係数などに基つき，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．Figure 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．)

)

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。Figure)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。Figure)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、光の散乱により様々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。従って、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、計算機シミュレーションによりその有効性を示す。波長 λ 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 $[L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}]$ をそれぞれ ϵ_M^λ , ϵ_H^λ 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） $[\text{mol} \text{ L}^{-1}]$ 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。この時、サンプル i の波長 λ における反射率 r_i^λ は次式で表されたとする。）

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

関数 $f^\lambda()$ は、波長 λ 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 ϵ_M^λ , ϵ_H^λ と色素の濃度 c_M^i , c_H^i を与えた場合、4.1 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^λ を得ることが出来る。）

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 チャンネル（2 波長 λ_1, λ_2 ）の非線形混合における信号の流れを Figure 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 ϵ_M^λ , ϵ_H^λ 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．)

Figure 12 において，混合時の非線形関数 $f^\lambda()$ 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．
この時，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節まで述べた．そ
こで，2 波長 λ_1, λ_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，(3) 式から得られる 2 波長 λ_1, λ_2 に関する 2 つの
非線形連立方程式を準ニュートン法²¹⁾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．)

提案する関数 $f^\lambda()$ 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⁸⁾を用いて準ニュートン法²¹⁾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 $\epsilon_M^{\lambda_1}, \epsilon_M^{\lambda_2}, \epsilon_H^{\lambda_1}, \epsilon_H^{\lambda_2}$ 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²¹⁾を用いて数値計算により解き， λ_1, λ_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 λ_1, λ_2 として 550nm, 600nm 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 570nm 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一つであることが，光伝播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分かった．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が，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，分離精度向上を行なう必要がある．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⁸⁾の適用も今後検討すべきである。)

)

謝辞)

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、有益な御助言を頂き、また数々の議論をさせて頂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、貴重なコメントを頂いた査読者に心より感謝いたします。)

)

文献)

)

1)) 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).)

2)) 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 D-II)) No.) 1) (1996)) 36-44.)

3)) 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).)

4)) 南茂夫, 合志陽一) 編集: 分光技術ハンドブック(朝倉書店, 1990).)

- 5)) 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)) 105-106.)
- 6)) 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) 25,9) (1996)) 537-543.))))
- 7)) C.) Jutten) and) J.) Hearult："Blind) separation) of) sources,) Part) I) :) An) adaptive) algorithm) based) on) neuromimetic) architecture,) ") Signal) Processing) 24) (1991)) 1-10.)
- 8)) G.) Burel："Blind) separation) of) sources:) a) nonlinear) neural) algorithm,") Neural) Networks) 5) (1992)) 937-947.)
- 9)) A.) Hyvoinen) and) E.) Oja："A) fast) fixed-point) algorithm) for) independent) component) analysis,")) Neural) computation) 9) (1997)) 1483-1492.)
- 10)) J.) Karhunen,) E.) Oja,) L.) Wang,) R.) Vig_rio) and) J.) Joutensalo："A) Class) of) Neural) Networks) for) Independent) Component) Analysis,) ") IEEE) Trans.) Neural) Network) 8) (1997)) 486-504.)
- 11)) 甘利俊一："連載) 独立成分分析) 第1回) 独立成分分析とは,") Computer) Today) No.) 87(1998)38-43. (以降)

連載継続) Computer Today No.) 102(2001)まで連載確認
済み))

12)) J.) Karhunen,) A.) Hyvarinen,) R.) Vig_rio,) J.) Hurri)
and) E.) Oja : "Applications) of) neural) blind) separation
to) signal) and) image) processing,") Proceedings) of) IEEE)
International) Conference) on) Acoustics,) Speech,) and)
Signal) Processing) 1,) 131-134) (1997).)

13)) N.) Tsumura,) H.) Haneishi,) Y.) Miyake:) "Independent
component) analysis) of) skin) color) image,")) Journal) of)
Optical) Society) of) America) A) Vol.) 16) No.9) (1999))
2169-2176.)

14)) N.) Tsumura,) H.) Haneishi,) Y.) Miyake,) : "Independent
component) analysis) of) spectral) absorbanace) image) in)
human) skin,") Optical) Review) Vol.) 7,)
No.6(2000)479-482.)

15)) 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) Vol.) 10,) No.) 2(日本
工業出版, 1999)) 1-4.)

16)) M.) J.) C.) V.) Gemert,) S.) L.) Jacques,) and) H.) J.) C.)
M.) Sterenborg:) "Skin) Optics," IEEE) Trans.) Biomed.) Eng.)

- 36) 12(1989)1146-1154.)
- 17) R.) R.) Anderson) and) J.) A.) Parrish:) "The) Optics) in) human) skin,") Journal) of) investigative) dermatology) 77,) 1(1981)13-19.)
- 18) 小島伸俊,) 羽石秀昭,) 三宅洋一:"化粧肌の質感推定 (III) H D T V 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,) 2(1994)) 78-83.)
- 19) M.) J.) Vrhel) and) H.) J.) Trussell: "Color) Correction) Using) Principal) Components,")) Color) Res.) Appl.) 17(1992)328.)
- 20) 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, 7(1998)) 384-391.)
- 21) 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).)
- 22)) Wang,) L.,) Jacues,) S.) L.,) Monte) Carlo) Modeling) of) Light) Transport) in) Multi-layered) Tissues) in) Standard) C,) University) of) Texas) M.) D.) Anderson) Cancer) Center) (1992).)

Figure) Captions

Figure 1 Mixture and separation of independent signals

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

Figure 3 Separation of skin image (a) skin color image with 64 x 64 pixels, images of color densities for the (b) first and (c) second independent components.

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

Figure 5 Model of spectral absorbance in human skin.

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

Figure 7 Spectral absorbance of oxy-hemoglobin and melanin¹⁷⁾

Figure 8 Scattering coefficient and anisotropy factor in epidermis and dermis layer¹⁶⁾

Figure 9 Examples of simulated skin spectral reflectance

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

Figure 11 Extracted densities of independent components

Figure 12 Mixture and separation of independent signals with known nonlinear function

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

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