

スペクトラルイメージングとその応用

津村徳道

千葉大学工学部情報画像工学科

インターネットショッピング、電子美術館や遠隔医療などにおいて、異なる照明下での物体の色を正確に再現することが求められている。本講演では、スペクトラルイメージング法に基づいた異なる照明下での正確な色再現法を紹介する。また、スペクトラルイメージング法の他の応用として、肌画像のメラニンやヘモグロビン色素に基づいた解析法を紹介する。

1. はじめに

近年、インターネットの急速な普及により、商品や美術品など様々な物体をネットワークを介して、画像として観察・鑑賞する機会が増えている。そういった中、デジタルカメラ、CRT、プリンタ等各デバイスの入出力特性をカラープロファイルとして保持しデバイス間の測色値を合わせるカラーマネジメントが行われている^{1,2)}。しかし、物体の測色値は撮影時の照明光源の特性に大きく依存するため、撮影光源と異なる照明下で画像を観察する場合、物体の色を正確に伝えることは出来ない。人間が物体をある光源下で直接見る場合には、視覚の特性である色順応効果が働き、照明光源の影響をある程度差し引いた物体固有の色を認識することが出来る³⁾。一方、物体が画像として表示された場合には、撮影時の照明環境という情報が人間の視覚システムに与えられず、その画像が物体本来の色を表すものなのか、あるいは照明光の影響を受けたものなのかを判断することが出来ない。この問題は、電子美術館、遠隔医療やインターネットショッピング等において安全性、信頼性などの観点から重要な問題である。そのため、現在、画像を撮影時の照明光源に依存しない分光反射率データとして保存、伝送することが求められている^{4,5)}。受け取った分光反射率

データに観察照明光の分光分布データを与えることにより、その照明光源下での正確な色再現を行うことができる。

一般に、物体の分光反射率を測定するためには分光光度計や分光放射輝度計が利用される。しかし、これらの装置では物体におけるスポット部分の平均分光情報が得られるのみである。物体各点での分光反射率を求める方法として、狭帯域の干渉フィルターを多数用いたマルチバンド撮影法がある^{6,7)}。しかし、この手法は大量のデータを保存・処理する必要があるため、現在では広帯域の色フィルターで撮影されたマルチバンド画像から事前に得られている分光反射率サンプルをもとに各点の分光反射率を推定する手法^{4,5,8-17,19-20)}が期待されている。現在、その推定法として低次元線形近似法⁸⁾やWiener推定法¹⁶⁾などの簡単な線形演算による手法や、ニューラルネットワーク等を用いた非線形演算による手法や重回帰分析のよる手法が提案されている^{15,17,20)}。これらの手法は、市販のデジタルカメラ等を用いて容易にスペクトル画像が得られるため、光計測の分野でも注目されている。本講演資料では、マルチバンド画像からの分光反射率の推定法とその展開、応用例について述べる。

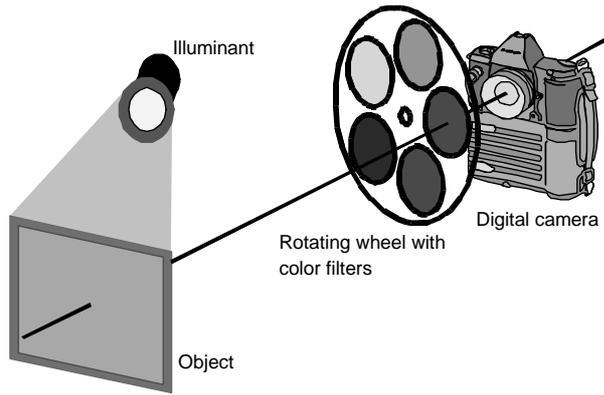


図 1 マルチバンド撮影

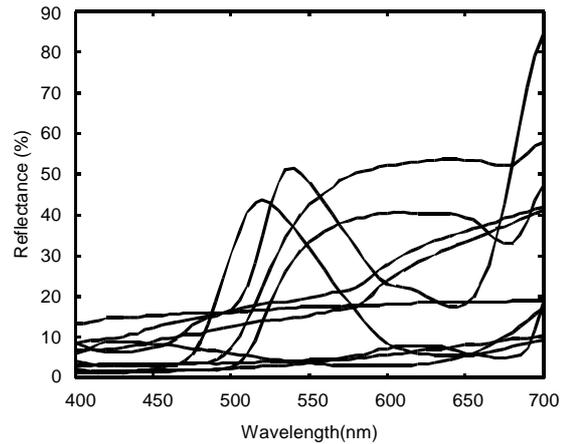


図 2 自然界の分光反射率サンプルの例

2. スペクトラル情報処理

(1) 分光反射率の推定逆問題

デジタルカメラで図1に示すように物体をマルチバンド撮影した場合^{1,2)}、画像の画素値は、その画素位置に対応するCCD (Charge Coupled Device)素子に入射する光強度や分光分布によって決定される。モノクロデジタルカメラで*i*番目の広帯域フィルターを通して物体を撮影した場合、画素位置(*x, y*)に対応するCCD素子に入射する光の分光分布は、 $t_i(\lambda)E(\lambda)r(x, y; \lambda)$ で与えられる。ここで $r(x, y; \lambda)$ は、画像座標(*x, y*)における物体の分光反射率、 $E(\lambda)$ 、 $t_i(\lambda)$ はそれぞれ、照明の分光放射輝度、*i*番目のフィルターの分光透過率を表すとする。レンズの分光透過率やCCDの分光感度などを合わせた総合的な分光積を $S(\lambda)$ とすると、各素子において得られるセンサー応答 $v_i(x, y)$ は、入射光 $t_i(\lambda)E(\lambda)r(x, y; \lambda)$ と分光積 $S(\lambda)$ を波長領域で積分したものと与えられるため、*m*をマルチバンド画像のバンド数とした時、センサー応答は式(1)で表される。

$$v_i(x, y) = \int_{400}^{700} t_i(\lambda)E(\lambda)S(\lambda)r(x, y; \lambda)d\lambda \quad (1)$$

$i=1\dots m$ 、この時、分光積 $S(\lambda)$ は波長400nmから700nmの可視領域以外では0であるとする。次

に数学的な取り扱いを簡単にするために、分光分布を離散化し、ベクトルや行列を用いて表す。 v を*m*個のバンドのセンサー応答を表した*m*個の要素を持つ行ベクトル、 r を物体の分光反射率を表す*l*個の要素で構成される行ベクトルを表すとした場合、式(1)は以下のようにベクトルと行列を用いて表される。

$$v = Fr \quad (2)$$

ここで、座標(*x, y*)は省略する。また、行列*F*は、*i*番目のフィルターの分光透過率を表す行ベクトル t_i をまとめた行列*T*

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_m]^T \quad (3)$$

と、照明とカメラの分光感度に対応する $l \times l$ の対角行列である行列*E*、*S*を用いて、以下のように定義される。

$$F = TES \quad (4)$$

式(3)で、 $[\]^T$ は、転置を示す。式(2)は、*l*次元の分光反射率ベクトル r を、行列*F*により*m*次元のセンサー応答ベクトル v に線形射影している。ここで、マルチバンド画像からの分光反射率の推定とは、式(1)を分光反射率ベクトル r に関して解くことである。しかし、行列*F*は正則でないため逆行列を持たず、この問題は不良設定問題となる。また、一般に正則でない行列に対する擬似的な逆行列として一般化逆行列¹⁸⁾が知られているが、分光分布の離散化数*l*は、バンド数*m*よりかなり大きいため精度

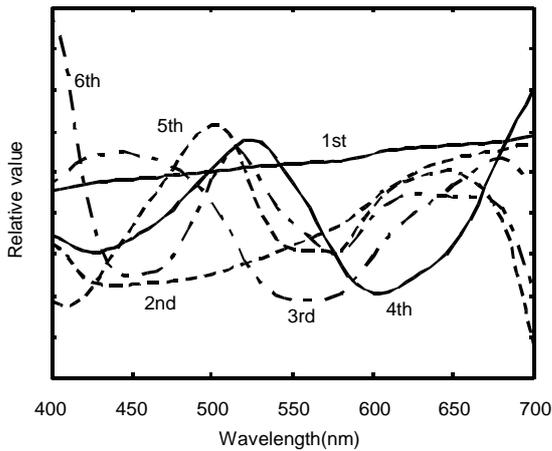


図 3 主成分

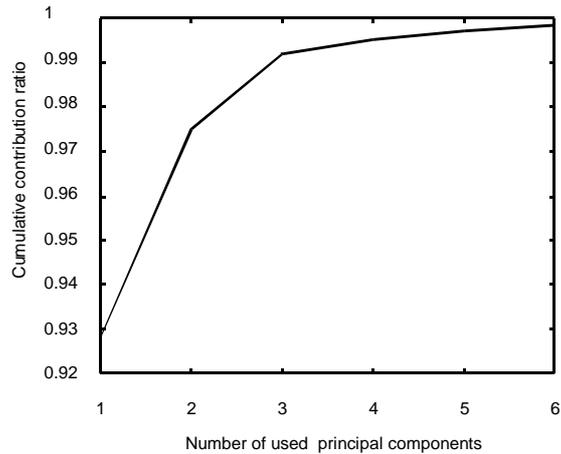


図 4 寄与率

の高い推定が行えない。次から示す手法は、既知の分光反射率サンプルをもとに未知の分光反射率を高い精度で推定する手法である。

(2) 主成分分析に基づく低次元線形近似推定法

Vrhel らの測定した自然界や人工物に存在する代表的な 170 個の分光反射率サンプル¹⁹⁾のうち 10 サンプルを図 2 に示す。ここで、分光反射率データは、400nm から 700nm の間を 5nm 間隔で離散化した 61 次元のデータである。図 2 から、これらの分光反射率の曲線はなめらかであることが分かる。これは、分光反射率を表す 61 次元のデータは冗長であり、分光反射率ベクトルは 61 次元ベクトル空間の一部の次元に局在していることを意味する²⁰⁾。分光反射率サンプルを主成分分析することにより、この冗長性を取り除くことができる。主成分分析は、次式に示すサンプルの共分散行列の固有分解により行われる。

$$C_{rr} = \langle (r - \bar{r})(r - \bar{r})^t \rangle = \sum_{i=1}^K \lambda_i \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^t \quad (5)$$

ここで、 \bar{r} は分光反射率サンプルの平均値、 $\langle \rangle$ はサンプルに関する平均、 λ_i 、 \mathbf{b}_i はそれぞれ i 番目の固有値、固有ベクトルである。固有値の大きい順に番号を付け、固有ベクトルは \mathbf{b}_i 、第

i 主成分ベクトルと呼ばれる。任意の分光反射率 \mathbf{r} は、主成分ベクトルを直交基底として次式のように展開することができる。

$$\mathbf{r} = \sum_{i=1}^K w_i \mathbf{b}_i \quad (6)$$

ここで、 w_i は各主成分ベクトルに対する得点または重みと呼ぶ。式 (6) において、全ての基底を用いず少数の基底で式 (7) に示すように近似することができる。このように小数の基底でベクトルを近似することを低次元線形近似という。ここでは特に基底の数をマルチバンド画像のバンド数 m に合わせる。

$$\mathbf{r} \cong \hat{\mathbf{r}} = \sum_{i=1}^m w_i \mathbf{b}_i = \mathbf{B}\mathbf{w} \quad (7)$$

$$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_m]$$

この近似の精度は、式 (9) で示される累積寄与率により評価することが出来る。

$$\chi_m = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^K \lambda_j} \quad (9)$$

図 3 と図 4 に Vrhel らのサンプルの第 6 番目までの主成分ベクトルと、使用した主成分数 m を変えた時の累積寄与率の変化を示す。低次元に

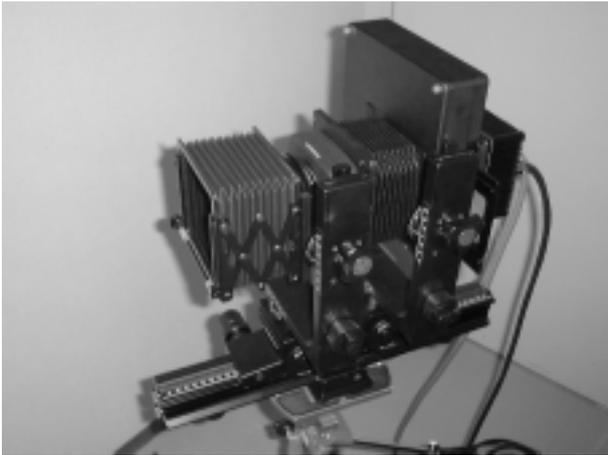


図5 プロジェクトで共同開発したマルチバンドカメラ

もかわらず高い精度で分光反射率の近似が実現されていることが分かる。式(7)を式(2)に代入し、式(10)が得られる。

$$v \cong FBw \quad (10)$$

ここで、FBは正方行列であり、行列Fの基底が独立であるとする、FBは正則になり逆行列を持つ。よって、式(10)をwについて解いて次式が得られる。

$$w \cong (FB)^{-1}v \quad (11)$$

式(11)を式(7)に代入し、分光反射率の推定値 \tilde{r}

$$\tilde{r} = B(FB)^{-1}v \quad (12)$$

を得る。式(12)は、センサー応答ベクトルvが与えられた時に、推定行列 $B(FB)^{-1}$ を用いて、分光反射率を推定する式であり、マルチバンド画像の全画素に適用することにより、物体各点での分光反射率を求めることができる。

(3) その他の推定法

サンプルの分光反射率と、式(7)による主成分ベクトルを基底として低次元線形近似された分光反射率との間の平均二乗誤差は、他のベクトルを基底とした場合に比べて最も小さい。しかし式(12)を用いた推定では、総合的な分光積Fが影響し、平均二乗誤差が最小と

なる推定解を与えない。サンプルの分光反射率と推定された分光反射率の間の平均二乗誤差を最小とする手法として、Wiener推定法(最小平均二乗誤差推定法)を用いることも出来る¹⁶⁾。また、カメラのガンマ特性等の非線形性や分光反射率サンプルの分布自体の非線形性等を考慮した非線形な推定法として、ニューラルネットワーク¹⁵⁾、重回帰²⁰⁾等を用いた手法が提案されている。

3. スペクトルイメージング法の応用例

(1) カラー画像マネジメント

1節において既に述べたが、コンピュータネットワークの急速な普及により、美術品や商品やなど様々な物体が、ネットワークを通して画像として鑑賞・観察されている。そこで、デジタルカメラ、CRT、プリンタ等各デバイスの入出力特性をカラープロファイルとして保持しデバイス間の測色値を合わせるカラーマネジメントが行われている^{1,2)}。しかし、物体の測色値は撮影時の照明光源の特性に大きく依存するため、撮影光源と異なる照明下で画像を観察する場合、物体の色を正確に伝えることは出来ない。この問題は、電子美術館、遠隔医療やインターネットショッピング等において安全性、信頼性などの観点から重要な問題である。そのため、現在、画像を撮影時の照明光源に依存しない分光反射率データとして保存、伝送することが求められている。受け取った分光反射率データに観察照明光の分光分布データを与えることにより、その照明光源下での正確な色再現を行うことができる。

千葉大学工学部情報画像工学科 三宅・津村研究室では、三菱電機マイコン機器ソフトウェア(株)、三菱電機(株)と共同で、1996.6-1998.3の間、IPA(情報処理振興事業協会)の支援を受けて、美術品を対象としたスペクトルイメージング法に基づく正確な記録・保存・再現方法に関

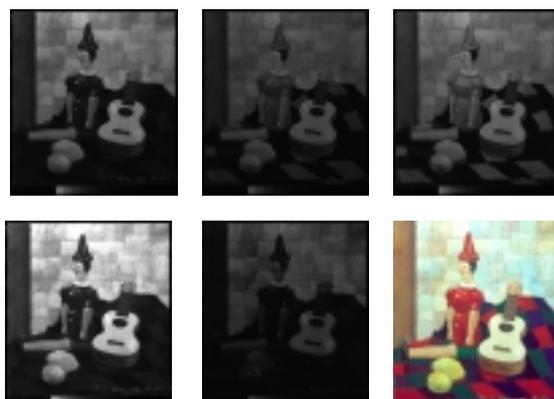
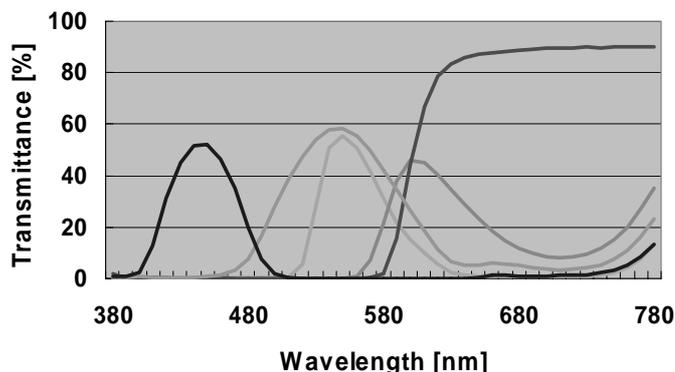


図6 撮影されたマルチバンド画像とその時用いたフィルタの分光透過率



する研究・開発を行った^{35,36)}。図5に開発された3072×2060画素、14bits、最大8フィルタ使用可能なマルチバンドカメラを示す。また、撮影された5バンドの画像と用いたフィルタの分光感度を図6に示す。さらに、2000.4-2002.3には、博物品などの3次元物体を対象として、スペクトル情報に加えて、その光沢感などの質感を記録・保存・再現するシステムを研究、開発した^{37,38)}。

(2) 画像入力システム設計

画像の各点での分光反射率が得られれば、その分光画像を入力として画像入力システムのシミュレータを作成することができる。特にデジタルカメラのフィルタ設計などでは、画素間の補間の必要のない3版式の場合は、空間的な分光情報は必要ないが、単版式の場合は補間の影響を設計に反映させるため、空間的な分光情報が求められている。分光画像のサンプルを複数サンプルとして用意することにより、最適な単版式のカラーフィルタ設計ができる。筆者らは、電子内視鏡用の単版式のカラーフィルタの設計を上記の手法で行っている³⁴⁾。

(3) 画像成分計測

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²⁶⁾、ロボットビジョン²⁷⁾等で求められている²⁸⁾。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、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)が古くから提案されている²⁹⁾。

マルチバンド画像から分光反射率を推定するタイプのスペクトルイメージング法の生体光計測への応用例として、肌画像の解析によるヘモグロビン分布とメラニン分布の抽出の例を示す^{30,31)}。

デジタルカメラで撮影されたRGB画像は、2節で述べた主成分分析に基づく低次元線形近似推定法により分光反射率画像に変換される。得られた分光反射率画像の画素値に対して、逆数の常用対数をとることにより、吸光度画像が得られる。ここで、肌を構成する色素は、主にヘモグロビンとメラニンであるとする近似から、主成分分析に基づき、2つの色素のみから構成される2つの主成分を抽出する。しかし、

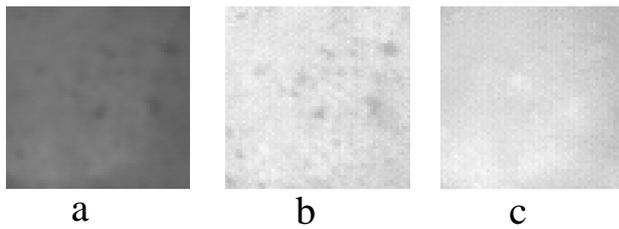


図7 独立成分分析の結果 a)オリジナル, b)ヘモグロビン成分, c)メラニン成分

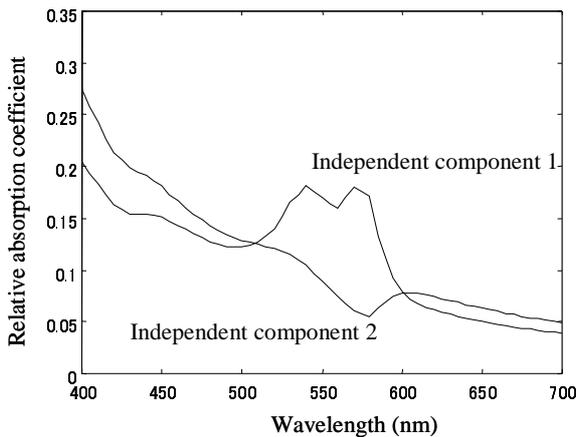


図8 (a)抽出された独立成分

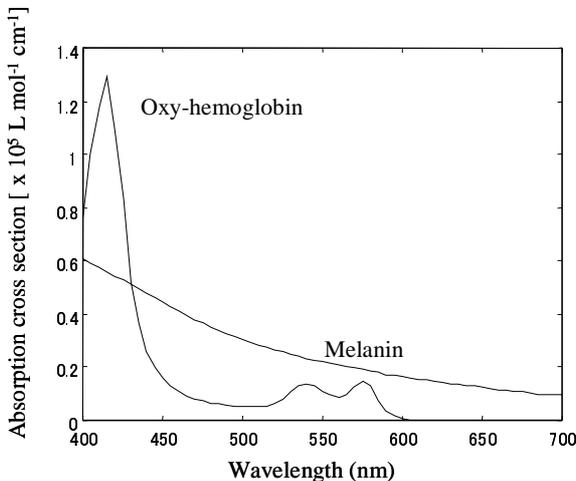


図8 (b)生体外での色素の吸収係数

抽出された主成分は、各色素の吸光特性に直接的に対応したものではない。そこで、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から、因子分析法の一種である独立成分分析法を、抽出された主成分に適用するこ

とにより、ヘモグロビンとメラニンに対応した吸光度を抽出することが出来る。図7に対象とする肌画像、抽出されたヘモグロビン分布とメラニン分布を示す^{30,31)}。ヘモグロビン分布においてニキビの成分が抽出されていることからこの手法の有効性が確認できる。また、抽出された吸収係数を図8 (a)に示す³¹⁾。図8 (b)に各色素を取り出して計測した結果を示す⁴³⁾。これより、抽出された吸収係数は、各色素の特徴をとらえており正しく抽出されていることが分かる。また、抽出した色素は光散乱の波長依存性の影響を受け、短波長域では吸収係数が少なく見積もられているところが興味深く、生体の生きたままでの吸収係数を生体の散乱係数などを反映したまま抽出していると考えられる。この手法の応用は、肌の疾患解析、肌色の色変換など多岐にわたると期待されている。

また、図7に示したように、メラニン成分とヘモグロビン成分に分解後、色素量を変化させて合成することで、色素成分に基づくリアルな顔色合成を実現することが出来る。これにより、美白剤適用後の顔色を合成したり、また、TV電話のための電子化粧への応用が期待されている^{45,46)}。

(4) 医用応用

日本では、高齢化社会が大きな社会問題となっており、情報通信技術による医療情報の提供や高齢者の健康情報管理を充実し、高齢者やその家族が安心して豊かに生活する社会を構築することが必要とされている。この時、情報通信技術のみだけでなく、高齢者から健康情報を取得するセンシング技術の開発が重要である。現在、生体から情報を収集する技術として、医療機器のネットワーク化、バイオチップ、遠隔医療技術、高齢者保護カメラなどの開発が盛んに行われている。遠隔医療や高齢者保護カメラの実現にあたり、患者の皮膚などの色情報をい

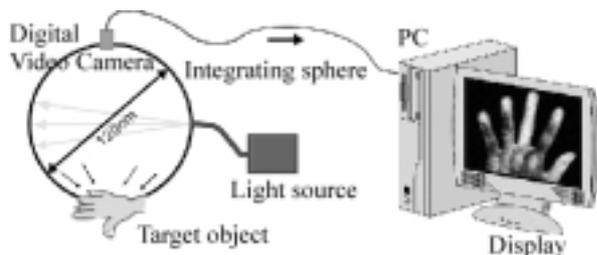


図9 リアルタイム肌成分計測システム

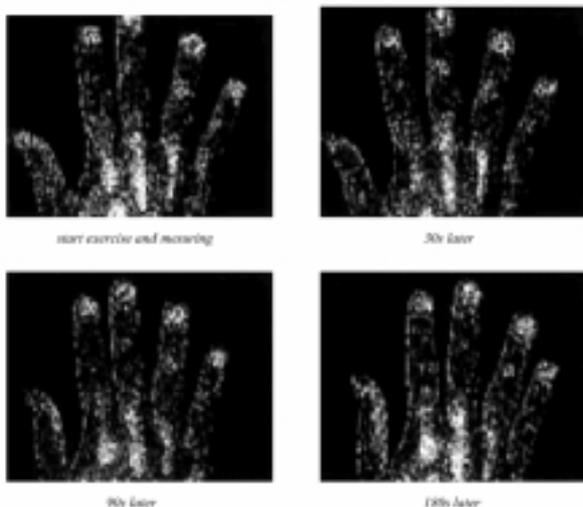


図10 無酸素運動時の酸素飽和度の変化

左上：計測開始，右上：30秒後，左下：90秒後，右下：180秒後

脱酸化ヘモグロビン色素の割合は酸素飽和度と呼ばれ、末梢循環系の酸素飽和度は生体の疾患や生理反応などと深い関係があると期待されている⁶⁾。有効な生体の生理反応を捕らえるためには、リアルタイムで酸素飽和度などの色素情報を計測する必要がある。先の独立成分分析を用いた手法に比べて、逆光散乱解析による手法は精度高く色素分量を検出できるため、このように医用応用としての酸素飽和度の計測が可能となる。

肌の色素成分分布を実時間で測定・表示するシステムを開発した⁴⁸⁾。図9に開発したシステムの概略図を示す。デジタルビデオカメラを

用いることで、静止画では得ることのできない様々な状況下での肌の変化の様子を計測し、生理的な肌の反応を捉えることができる。また、実用性を上げるために、処理の機器依存性を軽減する設計を実現している。

無酸素運動時における色素成分分布の変化を測定した⁴⁸⁾。指を含む手の甲側を測定部位とし、できるだけ動かさない様にしながら180秒間連続してスクワット運動を行う。無酸素運動とは酸素供給量を越える酸素を消費する運動である。測定した色素成分変化のうち酸素飽和度の変化を図10に示す。測定開始時に比べ、90秒後には全体的に酸素飽和度が落ちている。特に中指の付け根部分、親指の部分において著しい低下が見られる。これらにより運動による酸素飽和度の低下が観測された。また運動による血液の増加により供給される酸素量が運動による酸素消費量を上回り、結果として90秒後を境に酸素飽和度が再び上昇している。このことは人間の負荷に対する反応を示していると考えられる。

次に、5秒間きつく手を握り、後に手を開くことで手の平への強い負荷に対する色素成分の反応を測定した⁴⁸⁾。測定部は手の平であり、測定は7.5フレーム毎秒で30秒間行った。圧力負荷がかかる領域の各色素成分の平均値を時系列変化を示すグラフを図11に示した。測定開始3秒後から8秒後までは手を握っており測定部位が隠れるため、データが欠如している。圧力負荷から開放直後に押し出されていたヘモグロビンが急激に回復し、血液が流れ込んでいる様子がわかる。同時に下がっていた酸素飽和度も回復している。しばらくは鬱血状態が続き、ヘモグロビン濃度、酸素飽和度共に徐々に平衡状態に戻っている。もちろんメラニン濃度に変化は見られなかった。このことから圧力負荷により、押し出された血液は急激に戻るもののしばらくは鬱血状態が続くことがわかる。

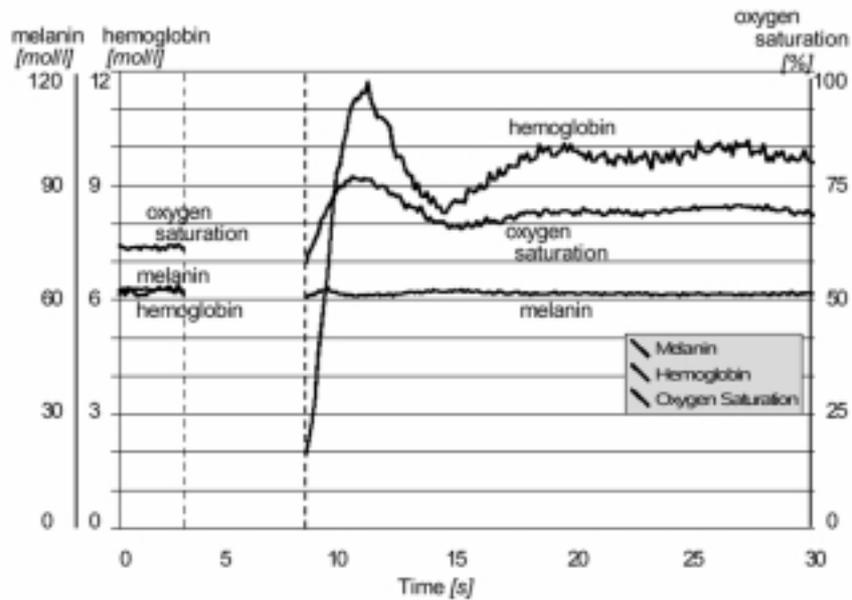


図 1.1 圧力付加のかかった領域の色素成分の変化

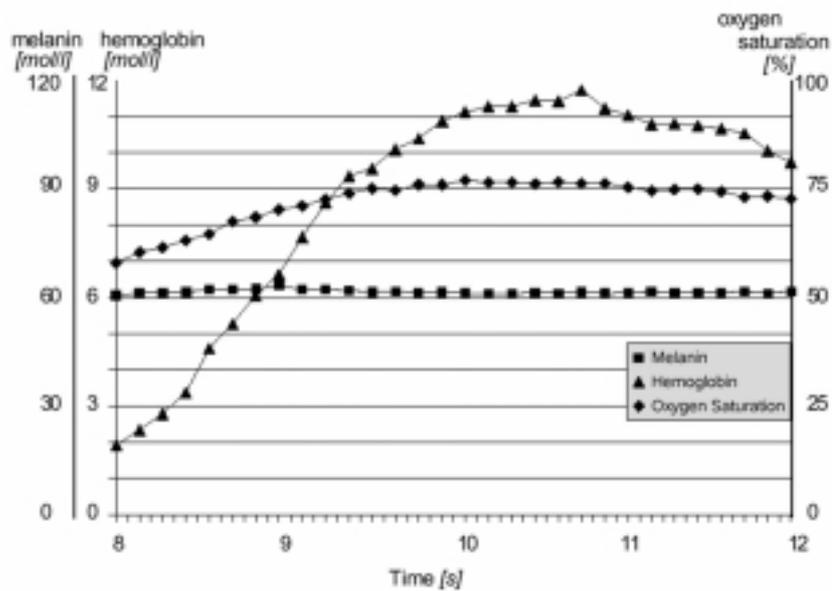


図 1.2 図 1.1 の開放直後を拡大したグラフ

開放直後を拡大したグラフを図 1.2 に示す。各点の間隔は 0.133[s] であり、静止画では得られない急激な変化の様子を捉えている。

4.まとめ

マルチバンド画像からの分光反射率の推定法とその展開、応用例について述べた。少数の

フィルタによるマルチバンド画像を用いたスペクトル画像計測法は、市販のデジタルカメラを用いて容易に実現できることから、様々な分野へ広がることが期待される。生体計測においては、遠隔医療における環境照明の影響の除去や分光情報に基づく患者の状態のモニタリング、肌疾患分布の解析、電子内視鏡による腫

瘍分布の解析などへの応用が進むであろう。

参考文献

- (1) Michael Stokes: "The History of the ICC," Proceeding of IS&T/SID The Fifth Color Imaging Conference, Color Science, Systems, and Applications (Scottsdale, Arizona, 1997) pp. 266-269.
- (2) 田島譲二: カラー画像複製論 カラーマネジメントの基礎 (丸善株式会社, 東京, 1996) .
- (3) Mark D. Fairchild: Color Appearance Models(Addison-Wesley, Mass, 1997).
- (4) 横山康明, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, 林純一郎, 斎藤雅行: "ヒューマンパーセプションに基づく高精細カラーマネジメントシステム -その美術館, 博物館収蔵品の記録再現への応用に関する研究 - " カラーフォーラム JAPAN '97 論文集 (東京,1997) pp.45-48.
- (5) 大谷百合, 小尾高史, 山口雅浩, 大山永昭, 小宮康宏: "遠隔画像表示システムにおける正確な色再現手法 " カラーフォーラム JAPAN '97 論文集 (東京,1997) pp.49-52.
- (6) 佐藤嘉伸, 河合秀夫, 田村進一, C C D 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 第14巻 第2号(1985) 112-120 .
- (7) 中野恵一, 小宮康宏, マルチスペクトルカメラを用いた物体識別, 応用物理 65 (1996)496-499 .
- (8) L . T . Maloney and B . A . Wandell, Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance, Journal of the Optical Society of America A 3 (1986) 29-33 .
- (9) M . J . Vrhel and H . J . Trussell, Color Correction Using Principal Components, Color Res . Appl . 17 (1992) 328-338 .
- (10) M . J . Vrhel and H . J . Trussell, Filter Considerations in Color Correction, IEEE Trans . Image Processing 3 (1994) 147-161 .
- (11) N . Hayasaka, S . Toyooka, T . Jaaskelainen, Iterative feedback method to make a spatial filter on a liquid crystal spatial light modulator for 2D spectroscopic pattern recognition, Optics Communications 119(1995)643-651 .
- (12) Tatsuya Shiobara, Shixin Zhou, Hideaki Haneishi, Norimichi Tsumura and Yoichi Miyake, Improved color reproduction of electronic endoscopes, J . Imag . Sci . and Tech . 40 (1996)494-501 .
- (13) H . Maitre, F . Schmitt, J . -P . Crettez, Y . Wu and J . Y . Hardeberg , Spectrophotometric Image Analysis of Fine Art Paintings, Proc . of the Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications (Scottsdale, Arizona, 1996) pp . 50-53 .
- (14) M . Wolski, C . A . Bouman, J . P . Allebach and E . Walowit, Optimization of Sensor Response Functions for Colorimetry of Reflective and Emissive Objects, IEEE Trans . Image Processing 5 (1996)507-517 .
- (15) 荒井佳文, 中内茂樹, 臼井支朗, 分光反射率推定に基づく光源変動による色ずれの修正法, 電子情報通信学会誌 D-II, J80-D-II (1997)558-568 .
- (16) H . Haneishi, T . Hasegawa, N . Tsumura and Y . Miyake , Design of color filters for recording art works, Proc . of IS&T's 50th Annual Conference (Boston, 1997)369-372
- (17) Friedhelm Koig , Reconstruction of Natural Spectra from Color Sensor Using Nonlinear Estimation Methods, " Proc . of IS&T's 50th Annual Conference (Boston,1997)454-458 .
- (18) G . Wyszeccki and W . S . Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed . (John Wiley & Sons, Inc . , 1982), Chap . 3, p . 167 .
- (19) 富永昌治, コンピュータビジョンと分光反射率推定, 光学 26(1997)671-676 .
- (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 第27巻 7号 pp . 384-391 (1998) .
- (21) 横山康明, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, 林純一郎, 斎藤雅行, ヒューマンパーセプションに基づく高精細カラーマネジメントシステム -その美術館, 博物館収蔵品の記録再現への応用に関する研究 - " カラーフォーラム JAPAN '97 論文集 (東京,1997) 45-48 .
- (22) 大谷百合, 小尾高史, 山口雅浩, 大山永昭, 小宮康宏, 遠隔画像表示システムにおける正確な色再現手法, カラーフォーラム JAPAN '97 論文集 (東京,1997) pp . 49-52 .
- (23) 岡本良夫, 逆問題とその解き方 (オーム社, 東京, 1992年) .
- (24) M . J . Vrhel, R . Gershon and L . S . Iwan, Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra, Color Res . Appl . 19(1994) 4-9 .
- (25) L . T . Maloney, Evaluation of linear models

of surface spectral reflectance with small numbers of parameters, Journal of the Optical Society of America A 3(1986)1673-1683 .

(26) 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) .

(27) 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 pp. 36-44(1996) .

(28) 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) .

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

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

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

(32)Hideaki Haneishi, Takayuki Hasegawa, Asako Hosoi, Yasuaki Yokoyama, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake: System design for accurately estimating the spectral reflectance of art paintings, Applied Optics Vol. 39, No. 35, pp.6621-6632(2000).

(33) Takayuki Kawaguchi, Norimichi Tsumura, Hideaki Haneishi, Masahiro Kouzaki and yoichi Miyake, "Vector Error Diffusion Method for Spectral Color Reproduction," Proc. IS&T PICS99 Conference pp.394-397 (1999)

(34) N. Tsumura, T. Tanaka, H. Haneishi, Y. Miyake, "Optimal Design of Mosaic Color Filters for the Improvement of Image Quality in Electronic Endoscopes" Optics Communications 145 pp.27-32(1998).

(35)横山康明, 細井麻子, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, " 絵画の記録・再現を目的とした高精細カラーマネージメントシステムに関する研究(第二報)ーヒューマンパーセプションを考慮した色再現ー, " 日本写真学会誌 第61巻6号 pp. 356-362(1998) .

(36)横山康明, 長谷川隆行, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, " 絵画の記録・再現を目的とした高精細カラーマネージメントシステムに関する研究(第一報)ー画像入力システムの設計ー, " 日本写真学会誌 第61巻6号 pp. 343-355(1998) .

(37)K.Tonsho, Y. Akao, N.Tsumura, Y. Miyake, Development of goniophotometric imaging system for recording reflectance spectra of 3D objects, Proc. SPIE Vol. 4663, p. 370-378(2001).

(38)Hideaki Haneishi, Takuya Iwanami, Tomoyuki Honma, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, "Goniospectral Imaging of Three-Dimensional Objects," Journal of Imaging Science and Technology Vol 45, No. 5, pp.451-483(2001)

(39) G. Burel : "Blind separation of sources: a nonlinear neural algorithm," Neural Networks 5 (1992) 937-947.

(40) A. Hyvoinen, J. Karhunen, and E. Oja, Independent Component Analysis (Wiley Inter-Science, 2001).

(41) J. Karhunen, E. Oja, L. Wang, R. Vigario and J. Joutsalo : "A Class of Neural Networks for Independent Component Analysis," IEEE Trans. Neural Network 8 (1997) 486-504.

(42) 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)

(43) R. R. Anderson and J. A. Parrish: "The Optics in human skin," Journal of investigative dermatology 77, 1(1981)13-19.

(44) Wang, L., Jacques, S. L., Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-layered Tissues in Standard C, University of Texas M. D. Anderson Cancer Center (1992).

(45) 植月啓次, 津村徳道, 小島信敏, 三宅洋一, 独立成分分析による顔色変化予測に基づく顔画像の評価, 日本写真学会誌 64巻 4号, 255-263(2001).

(46) N. Tsumura, K. Uetsuki, N. Ojima, Y. Miyake, "Correlation map analysis between appearance of Japanese facial images and amount of melanin and hemoglobin components in the skin," Proc. SPIE 4299 pp.252-260(2001).

(47) Norimichi Tsumura, Miki Kawabuchi, Hideaki Haneishi, Yoichi Miyake, Mapping pigmentation in human skin from multi-channel visible spectrum image by inverse optical scattering technique, Journal of Imaging Science and Technology Vol 45, No. 5, pp.444-450(2001)

(48) 中尾大輔, 津村徳道, 三宅洋一, 実時間分光画像処理による肌の色素成分分布変化の測定, Medical Imaging Technology Vol.20 No.2, 123-133(2002).