デジタルミュージアムのための質感再現		
津村徳道*,中口俊哉*,宮田	公佳**, 三宅洋一*	
*千葉大学工学部情報画像工 〒263-8522 千葉市稲毛区別		
**国立歴史民俗博物館 研究 〒285-8502 千葉県佐倉市城		
Appearance reproduction for digital museum		
Norimichi TSUMURA*, Toshiya Nakaguchi*, Kimiyoshi Miyata**, and Yoichi MIYAKE*		
*Department of Information and Image Sciences, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku 263-8522		
**National Museum of Japanese History, 116 Jounai-cho, Sakura-shi, Chiba 285-8502		
(Received	; Accepted	)

# 英文要旨 (Synopsis)

Museums have a large number of materials that require preservation as long as possible. On the other hand, it is also important to use these materials for exhibitions, investigations, researches, education and so on. Digital archiving system promises to overcome this dilemma. However, it is still difficult to complete precise recording for color and appearance of the materials, since it takes huge time and efforts for this recording. In this review, we will introduce the precise and efficient recording and reproduction methods.

### 日本文要旨

保存と展示のジレンマから、博物館などの収蔵物の多くは、人々に鑑賞されずに歴史的価値を 後世に引き継ぐためにひたすら眠りつづけている。デジタルアーカイブはこれらの問題を解決す るものとして期待されている。しかし、色や質感の正確な記録には多大な労力と時間を要するため、 正確なデジタルアーカイブを実現するのは現状では困難である。本解説では、我々の研究例を 基に、正確かつ効率的な物体の色と質感の正確な記録方法と再現方法について概説する。これ らの技術が益々精錬され、実用化され、我々に膨大な文化遺産との新たな交流を与えると信じて いる。

#### 1. はじめに

通常,博物館の収蔵資料点数は、その博物館において展示されている数の何十倍にもなる. たとえば、国立歴史民俗博物館においては、レプリカなどを含めて 200,000 点もの資料を収蔵しているが、実際に展示しているのは、約8,100点である.収蔵物の多くは人々に鑑賞されずに、歴史的価値を後世に引き継ぐためにひたすら眠りつづけているといっても過言ではない<sup>1)</sup>.

貴重な文化遺産を永く保存するためには、適切な温度と湿度下において収蔵庫において管理する必要がある。収蔵物を展示した場合には、展示室の照度を低く設定したとしても光照射による資料劣化は厳密には不可避であるため、資料保護の観点から多大な労力によるレプリカ作成とそのレプリカの展示に替えることも多い。現在の博物館では、このような展示と保存の間のジレンマから、莫大な収蔵物のほんの一部を我々一般の鑑賞者に対して展示しているのが現実である<sup>1)</sup>

収蔵物のディジタルアーカイブは、以上の問題を一気に解決し、人類に大量の貴重な文化遺産との新たな交流を生む技術として大変期待されている。ディジタルアーカイブ白書2005<sup>2)</sup>によると、調査した1,687館のうち、82.3%(1,347館)が Web サイトを開設し、そのうちデジタルアーカイブを公開しているのは33.0%(444館)であったという。これから、は2003年の108館、2004年の133館と、年を追って着実にデジタルアーカイブが普及している様子が見られる。しかし、このように各館のデジタルアーカイブへの関心は高いものの、ほとんどの館では収蔵資料の一部をデジタルカメラにより撮影したものをWebで公開しているにすぎない。デジタルカメラにより撮影した画像データは、撮影時の照明の色や配光の影響を受けており、収蔵資料の限定的な見えを公開しているに過ぎない。収蔵資料は収蔵庫に安全に管理し、色や質感を正確に記録したアーカイブをあたかも実物のように再現して公開するという目標からは程遠い状態である。これらは、学芸員などの人員不足や、色や質感の正確な記録には多大な労力と時間を要するということが一つの原因である。そこで、できるだけ効率的に収蔵物を高精細にディジタル記録し、できるだけ実物に近い画像として表示デバイスに再現、鑑賞できるようにする技術の研究・開発が求められている。

本解説では、著者らのこれまで行った研究から、美術品などを高精細にかつできるだけ効率的に記録し、正確に再現する手法を概説する。本解説では特に色と質感(光沢感)の正確な記録に関して概説する。色の効率的な記録に関しては、1998年に本誌に掲載された我々の原著論文<sup>3)</sup>から主に引用した。質感(光沢感)の効率的な記録に関しては、2005年に日本写真学会誌に掲載された我々の原著論文<sup>4)</sup>から主に引用した。質感(光沢感)の正確な再現に関しては、2004年に映像情報メディア学会誌の掲載された我々の原著論文<sup>5</sup>から主に引用した。

色の正確な記録に関しては、光源や画像システムの分光特性に依存しない物体それ自身の分光情報として記録することが理想である。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、挟帯域の

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  $^{7}$ . しかし,この手法は,撮影に大変な時間を要し,また大量のデータを保存・処理する必要があるため,現在では Fig.1(a)に示すように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効率的推定する手法  $^{10,11)}$ が主流である.現在,その推定法としてWiener 推定法などの簡単な線形演算による手法が提案されているが  $^{12}$ ,本解説では,これまでの方法を簡単に説明するとともに,より効率的な手法として著者らの提案したセンサー応答の高次の項を利用した重回帰分析法  $^{3}$ を用いた手法について概説する.

質感(光沢感)の正確な記録に関しては、Fig.1(b)に示すように一般的に照明方向の変化に伴う物体色と光沢の変化を計測することにより行われる。これまで我々は照明角度を変化させて撮影したマルチバンド画像群から、物体固有の分光反射率と照明変化に伴う反射光の強度変化を偏角反射パラメータとして推定し、任意の照明環境下での画像を再現する偏角分光イメージング法を提案してきた <sup>13)</sup>.この手法では照明方向を複数変化させて撮影した離散的な画像群を、反射モデルに基づき補間して連続データとして扱う。高精度な反射特性パラメータの補間は密なサンプリング間隔により可能となるが、その反面、冗長なデータが増加し効率的ではない。本解説では、これまでの方法を簡単に説明するとともに、特に、より効率的な手法として著者らの提案した適応的な偏角分光イメージング法について概説する <sup>4)</sup>.

既に述べたように、物体の色や光沢は、照明の色や配光の影響をうける. 物体を分光反射率情報で記録することにより様々な色の照明下での色を正確に再現することができる. また、偏角反射特性を記録することにより、様々な配光分布下の物体の質感(光沢感)の見えを再現することができる. 本解説では、コンピュータグラフィックス技術を用いた任意配光分布下での再現の例を示す. また、光沢の再現はディスプレイの輝度の影響を大きく受けるため、その違いを考慮したより正確な質感再現方法についても最後に述べる.

## 2. 分光情報に基づく正確な色再現とその効率的撮影 3)

### 2.1 画像モデル

Fig. 1(a)に示すように、モノクロデジタルカメラにカラーフィルターを入れ換えて物体をマルチバンド撮影した場合、画像の画素値は $v_i(x,y)$ は、式(1)のように与えられる.

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

ここでは $r(x, y, \lambda)$ 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。また、レンズの分光透過率やCC D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。

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. ν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.

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{r} \tag{2}$$

ここで、座標(x, y)は省略した。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べクトルをまとめた行列 T

$$T = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_1, & \mathbf{t}_2, & \cdots, & \mathbf{t}_m \end{bmatrix}^t \tag{3}$$

と,照明とカメラの分光感度に対応する $I \times I$ 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.

$$F = TES (4)$$

式(3)で、 $[\int d, 転置を示す. 式(2) は、1次元の分光反射率ベクトルを、行列 F により m 次元のセンサ応答ベクトル <math>r$  に線形射影している.

マルチバンド画像からの分光反射率を求める際は、計測されたマルチバンド画像 $\nu$ 、別に測定されたカメラ特性 Fを用いて、式(2)を分光反射率ベクトル $\nu$  に関して解く必要がある。ここで通常よく利用されている推定法は、時節に述べる Wiener 推定法である。

## 2. 2 Wiener 推定法

サンプルの分光反射率 $\mathbf{r}$ と推定された分光反射率 $\widetilde{\mathbf{r}}$  の間の平均二乗誤差 E を, 以下のように表す.

$$E = \left\langle (\mathbf{r} - \widetilde{\mathbf{r}})^{t} (\mathbf{r} - \widetilde{\mathbf{r}}) \right\rangle \tag{5}$$

⟨ 〉は分光反射率サンプルに対するアンサンブル平均を表す. 分光反射率サンプルは, 撮影対

象の分光反射率に関する統計的性質を与えるもので、マルチバンド画像からの分光反射率を求める際の大変重要な要素となる. 撮影対象を考慮して、適切な分光反射率サンプルを用意することが望ましい.

ここで、式(6)に示すようにセンサー応答ベクトルから分光反射率を推定する推定行列 G を 考える.

$$\tilde{r} = Gv$$
 (6)

この時,式(5)で示される平均二乗誤差を最小とする推定行列は,

$$G = R_{rv}R_{vv}^{-1} \tag{7}$$

で与えられる. ここで,  $R_{rv}$ ,  $R_{vv}$  は, サンプルに関するそれぞれ r とv の相互相関行列, v の自己相関行列を示す.

$$R_{rv} = \langle rv^t \rangle \tag{8}$$

$$R_{vv} = \left\langle \mathbf{v} \mathbf{v}^t \right\rangle \tag{9}$$

rの自己相関行列を,式(10)に示す $R_{rr}$ で表すと,

$$R_{rr} = \langle \mathbf{rr}^t \rangle \tag{10}$$

式(2)を用いて式(7)は,

$$G = R_{rr} F^{t} (F R_{rr} F^{t})^{-1}$$
 (11)

としても与えられる.

センサー応答にノイズnが含まれる場合には、式(2)は、

$$\mathbf{v} = F\mathbf{r} + \mathbf{n} \tag{12}$$

と表せる. ここで, 入力ベクトルとノイズベクトルが無相関ならば, 平均二乗誤差を最小にする推定 行列は以下の式で与えられる.

$$G = R_{rr}F^{t}(FR_{rr}F^{t} + R_{nn})^{-1}$$
(13)

ここで、 $R_{nn}$ は、ノイズの自己相関行列を示す.

$$R_{nn} = \langle \mathbf{n}\mathbf{n}^t \rangle \tag{14}$$

このように Wiener 推定は、信号とノイズの統計量が分かっている場合には簡単な線形演算で推定値の平均二乗誤差を最小とする推定行列を与える.

### 2.3 非線形項を含む重回帰分析法による少ないバンド数からの効率的な分光画像推定3)

マルチバンド画像から分光反射率の推定問題に重回帰分析法を適用する方法をまず説明する.ここで,重回帰分析法としてベクトル・行列演算で簡単に計算できる特異値分解法を用いた 14. 分光反射率サンプルベクトルと式(2)を用いて得られるセンサー応答ベクトルを,それぞれ以下のように行列 R, V でまとめて表す.

$$R = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \cdots \mathbf{r}_n] \tag{15}$$

$$V = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \cdots \mathbf{v}_n] \tag{16}$$

Vを説明変数, Rを目的変数とした V から R への回帰式の回帰係数行列 G は, 行列 V の最小二乗最小ノルム解を与える Moore-Penrose の一般化逆行列を用いて次式のように計算される.

$$G = RV^{t}(VV^{t})^{-1} \tag{17}$$

この回帰係数行列を、式(6)のように推定行列として用いて分光反射率が推定される.

重回帰分析法では、説明変数と目的変数の間に非線形な関係がある場合、推定精度を向上するために説明変数の高次の項を用いることで行われる。分光反射率の推定においてもセンサー応答の高次の項を入れることが可能である。この時、式(16)に含まれるそれぞれのセンサー応答ベクトルは、高次の項も含めた以下のようなベクトルを用いる。

$$\mathbf{v}_{i} = [v_{i,1} \cdots v_{i,m}, v_{i,1} \times v_{i,1}, v_{i,1} \times v_{i,2} \cdots higher order terms, \cdots] \quad (18)$$

式(18)で得られる新たなセンサー応答ベクトルを高次の項を用いない場合と同様に取り扱い、式

(17)から回帰変数行列が計算される.

## 2.5 マルチバンド画像を用いた非線形項の有効性の評価

非線形項を用いた重回帰分析法の有効性を、実際のマルチバンド画像を用いて示す.油絵をFig. 2 示す総合的な分光積を持つシステム(ディジタルカメラ Kodak DCS420m, Fuji 色素フィルターBPB42, 45, 50, 53, 55, 60)を用いて実際にマルチバンド撮影を行った.撮影は、観測ブース(Macbeth Spectralight II)におけるD65近似光源を用いて行った.撮影された6バンドのマルチバンド画像から Wiener 推定により得られた分光反射率画像をオリジナルの物体として、推定法の評価を行った.分光反射率サンプルとして、Holbein の油絵の具の分光反射率 147 サンプル<sup>15)</sup>を用いた. Fig. 3に、2バンドで撮影されたマルチバンド画像におけるWiener推定、2次の項を考慮した重回帰法による再現結果を表す. 2次の項を考慮した重回帰分析法に基づく手法がもっともオリジナルに近い再現が行われていることが分かる. このことより、正確な分光的色再現において、非線形項を用いた重回帰分析法は、より少ないバンド数で効率的の有効な分光情報を得ることができることがわかる.

#### 3. 適応的偏角分光画像法による効率的な光沢感記録 4)

### 3. 1 偏角分光イメージング法 13)

物体の反射光は Fig.4に示す二色性反射モデル  $^{16)}$ を用いて近似できる。このモデルは物体色の影響を受けず入射光の色のみから成る表面反射光成分と,物体表面色素粒子の光吸収波長に依存した内部反射光成分とに分離して全反射光を近似する。反射光  $f(x,y,\omega)$  は各成分の線形和として次式で与えられる。

$$f(x,y,\omega)=k_s(x,y,\omega)e_s+k_d(x,y,\omega)e_d(x,y)$$
 (19) ここで、 $\omega=[\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r]$ はそれぞれ入射光源の天頂角 $\theta_i$ 、方位角 $\phi_i$ と視点方向の天頂角 $\theta_r$ 、方位角 $\phi_r$ を表しており、 $\mathbf{e}_s$  は表面反射光成分の色を表す単位ベクトル、 $\mathbf{e}_d(x,y)$  は内部反射光成分の色を表す単位ベクトルである。表面反射光の色成分は光源色に等しいとするので $\mathbf{e}_s$  は標準白色板を撮影することで得られ、 $\mathbf{e}_d(x,y)$  は事前に偏光板を用いた内部反射光成分撮影法 17) を用いて取得することが出来る。 $k_s(x,y,\omega),k_d(x,y,\omega)$  はそれぞれ表面反射光成分,内部反射光成分の強度を表す。理論的には $\mathbf{e}_s$  と $\mathbf{e}_d(x,y)$  のベクトルが完全に同じでなければ撮影した色情報から $k_s(x,y,\omega),k_d(x,y,\omega)$  それぞれの成分に分離することが可能である。偏角分光イメージング法では、複数回計測して得られた各成分を光の反射モデル 18-21)に近似してモデル化を

ここでは、光の反射モデルとして、比較的計算コストが少なく一般的に広く利用されている Phong モデル  $^{18)}$ を用いる. Phong モデルは、光源の入射角と視点角度 $\omega$  における各反射光強度を次のように与える.

行うことにより、任意照明方向における画像再現を行うことが可能となる.

$$k_s(\omega) = A_s \cos^n \alpha$$

$$k_d(\omega) = A_d \cos \theta_i$$
(20)

ここで、 $\alpha$  は光源入射の正反射方向と視点方向がなす角度である。パラメータ  $A_s$  、 $A_d$  は各成分の強さ、n は表面反射光の収束度を表しており、n の値が大きくなるほど表面は滑らかで尖鋭な光沢を表現する。

本解説では、5 種類のカラーフィルタを用いて撮影したマルチバンド画像群から分光反射率を推定し分光画像を得る。カメラのセンサ応答ベクトル $\nu(x,y,\omega)$ は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{v}(x, y, \omega) = F\mathbf{f}(x, y, \omega)$$

$$= k_s(x, y, \omega)F\mathbf{e}_s + k_d(x, y, \omega)F\mathbf{e}_d(x, y)$$

$$= A_s(x, y)\cos^{n(x,y)}\alpha F\mathbf{e}_s + A_d(x, y)\cos\theta_i F\mathbf{e}_d(x, y)$$
(21)

ここでF は前節と同様にカメラのシステムマトリクスを表す。重回帰分析などを用いて擬似逆行列 $F^{-1}$  を推定することで,センサ応答ベクトル $\mathbf{v}(x,y,\omega)$ から  $\mathbf{f}(x,y,\omega)$ が得られ, $k_s(x,y,\omega),k_d(x,y,\omega)$ 値を算出できる。複数回の計測データを最小自乗近似を用いて反射モデルにフィッティングすることで反射モデルパラメータを得る。

## 3.2 適応的な照明方向、カメラ方向のサンプリング 4)

高精度な偏角反射パラメータを計測するためには多数のカメラ・照明方向における撮影が必要となる。そこで偏角分光画像法では反射モデルに近似することで撮影回数を削減することができるが、近似精度は撮影位置に大きく依存する。効率的かつ高精度に偏角反射特性を計測するためには、適切なカメラ・照明方向を決定する必要がある。一般に表面粗さ(収束度 n に対応)が既知であれば、少数で最適なカメラ・照明の配置を算出することができる。しかし、当然ながら表面粗さは未知であるため、カメラ・照明配置の適切さを客観的に評価することも困難である。そこで、Fig.5 に示すような、粗いサンプリングから適応的な細かいサンプリングに段階的に計測する手法を我々は提案している。このとき、対象物体の表面粗さパラメータを所定のアルゴリズムに従って仮定し、仮定した粗さ特性を有する物体を計測するのに適切なカメラ・照明配置を算出する。この配置を用いて実際に計測を行い、仮定した値の妥当性を検証することで対象の表面粗さを決定するという手法を用いる。仮定した粗さ特性が妥当ならはこの時点で計測が終了する。これにより物体の表面粗さに適応的な効率的撮影法を実現している。

従来,物体全体の表面粗さを均一とする仮定や表面の色情報を用いて領域をクラスタリング分割し,各領域内は均質であるという仮定で粗さパラメータを計測する手法 <sup>22)</sup>が提案されてきた.しかしこれらの仮定は複雑な実物体に対しては成立しないため,我々は,物体表面の画素単位で異なる粗さパラメータを有するという条件での測定を実現している.

一般に撮影対象の形状変化は非連続的であり、オクルージョンも考慮すると、カメラ・照明方

向の決定は組合せ最適化問題として定式化する必要がある。カメラと照明の配置場所は計測対象物体を中心にした同心円上とし、中心角を $n_p$  個に分割して与える。 $n_p$  の増加と共に探索する解の組合せ総数は爆発的に増加する為、我々は組合せ問題の強力なヒューリスティック解法である遺伝的アルゴリズム  $^{23)}$ を用いて適切なカメラ・照明方向を決定した。アルゴリズムの詳細と効率化の効果は、参考文献(3)を参照されたい。

### 3.4 再現結果

実画像へ適用するため、Fig.6 に示す画像計測システムを構築し画像再現実験を行った.本システムは3Dディジタイザ(コニカミノルタVivid910)、回転式マルチバンドフィルタ、走行台付ロボットアーム(Mitsubishi MELFA A-2)、照明光源から成る.これらのハードウェアは計算機上のプログラムから制御し、撮影処理は自動化されている.計測結果を元に画像を再現した結果を Fig.7 に示す.ポリゴンの回転、移動、そして照明方向の変化による光沢の変化をリアルタイムに再現するため、グラフィックスハードウェアを用いて並列演算を行った.この開発にはATI社が提供しているソフトRender Monkeyを用いた. Render Monkeyを用いることによりMicrosoft 社の Direct Graphics や OpenGL といった 3D 描画 API でサポートされているリアルタイムシェーディング言語(HLSL やGLSL)による開発、プレビュー表示などを GUI 操作で容易に行うことができる.

## 4. 表示デバイスや視環境に依存しない物体の光沢感再現法 5)

表示デバイスに依存しない画像再現としては、sRGB <sup>24)</sup>のように標準色空間を使用したり、ICC Profile<sup>25)</sup> のようにデバイスのプロファイルを記述する手法が一般的であった。しかしこれらの手法では、照明などの視環境が限定されており、各デバイスの特性を予め計測する必要があるため実用的な手法ではない。また、表示デバイスに依存しない色再現については考慮されているが、色に次いで重要とされる光沢感再現に関しては考慮されていない。

そこで我々は、光沢感に着目し、表示デバイスや視環境に依存しない光沢感再現方法を提案した。Ferwerda らは物体の持つ物理的特性のうち、色・偏角反射特性と人間が知覚する光沢感の関係をモデル化した<sup>26)</sup>。本研究では、Ferwerda らの手法を拡張し、デバイスの最大輝度・物体の偏角反射特性と人間が知覚する光沢感の関係をモデル化することにより、異なる最大輝度を持つデバイス間における最大輝度に依存しない光沢感再現方法を実現した。Fig.8に光沢感モデルを作成する際に用いた画像の例を示す。デバイスの最大輝度I、光沢成分の強度、広がりを制御するパラメータAs、nを変化させている。

Fig. 8 に示すような評価画像を、20名の被験者に光沢感Gに関して評価してもらった結果を統計処理することによって Fig. 9 に示すような等光沢感曲面(図では曲線)を得ることが出来る。Fig. 9 は,説明のため I, A s,n o 3 次元空間の中から n= 0.027As +0.005 の面を切り出して表示している。Fig. 10 に,得られた等光沢感曲面を利用して異なる輝度をもつデバイスの間の光沢間を補正した結果をしめす。Fig. 10 (a)は輝度の高いディスプレ

イに表示された原画像、Fig.10 (b)は、原画像をそのまま輝度の低いディスプレイに表示した場合である。原画像に比べて対象の光沢感が低く感じられる。Fig.10 は、原画像と同じ光沢感を与えるように Fig.9 に示す等光沢感曲線上を維持したまま、デバイス輝度 I の変化に従って、光沢感パラメータ As,n を変化させた場合の補正画像である。原画像に近い光沢感を再現できている。

#### 4.まとめ

歴史的価値を後世に引き継ぐためにひたすら眠りつづけている大量の収蔵品を,デジタルアーカイブという形で世に出していくためには,物体の色と質感の正確かつ効率的に記録することが必要である.本解説では,我々の研究例を基に,正確かつ効率的な物体の色と質感の正確な記録方法について概説した.また,記録された色と質感を様々な照明環境化で,かつ様々な表示デバイスで正確に再現する手法の一部を紹介した.これらの技術が益々精錬され,実用化され,我々に膨大な文化遺産との新たな交流を与えると信じている.また,その爆発的な交流から,現在のどちらかというと無機的・流動的な時代に生きる我々に,人類の歴史と我々の遺伝子にきざまれた活力が得られるものと期待する.

# 文献

- 1)デジタルアーカイブ白書2005, デジタルアーカイブ推進協議会(2005).
- 2)Kimiyoshi MIYATA, Issues and Expectations for Digital Archives in Museums of History: A View from a Japanese Museum, Proc. Archiving Conference, IS&T, pp. 108-111 (San Antonio, Texas, April, 2004).
- 3) 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(1998) pp.384-391.
- 4) 中口 俊哉, 河西 将範, 津村 徳道, 三宅 洋一,偏角分光イメージング法におけるカメラ・照明方向の最適化,日本写真学会誌, Vol. 61. No.6(2005).(印刷中)
- 5) 津村徳道,池田哲男,三宅洋一,表示デバイスや視環境に依存しない物体の光沢感再現法,映像情報メディア学会誌, Vol.58. No.9, (2004)pp.1324-1329.
- 6) Katsushi Ikeuchi, Yoichi Sato, "Modeling from Reality," (Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass. USA 2001)
- 7) Marc Levoy et al, The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues, Proc. SIGGRAPH2000 (2000) pp.131-144.
- 8) F. Bernardini, I. Martin, J. Mittleman, H. Rushmeier, G. Taubin. Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Pieta'. IEEE Computer Graphics & Applications, 22(1), (2002)pp. 59-67.
- 9) 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.
- 10) Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, and Y. Miyake, J. Hayashi, M. Saito: Proc. 5th Color Imaging Conference (IS&T/SPIE, San Jose, 1997) 169.
- 11).M. Yamaguchi, R. Iwama, Y. Ohya, T. Ohyama, and Y. Komiya: Proc. SPIE 3031 (IS&T/SPIE, San Jose, 1997) 482.
- 12) 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, (2000)pp.6621-6632.
- 13) Hideaki Haneishi, Takuya Iwanami, Tomoyuki Honma, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Goniospectral Imaging of Three-Dimentional Objects," Journal of Imaging Science and Technology Vol 45, No. 5, (2001)pp.451-483.
- 14)中川徹, 小柳義夫, 最小二乗法による実験データ解析(東京大学出版会, 東京, 1982)
- 15) Norimichi Tsumura, Hideki Sato, Takayuki Hasegawa, Hideaki Haneishi, and Yoichi Miyake, "Limitation of color samples for spectral estimation from sensor responses in fine art painting", Optical Review 6. 1 (1999)57-61.
- 16) S. A. Shafer.: "Using color to separate reflection components.", COLOR Research and application, 10, 4, (1985)pp.210-218.
- 17) 三宅洋一, "ディジタルカラー画像の解析・評価", 東京大学出版会, 東京,2000, pp.45-47.
- 18) B. Phong.: "Illumination for computer-generated pictures.", Communications of the ACM, 18, 6, (1982) pp.311-317.
- 19) Cook R. L. and K. E. Torrance.: "A reflectance model for computer graphics.", Computer Graphics, 15, 3(1982) pp.307-316..
- 20) K. E. Torrance and E. M. Sparrow.: "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces.", J. Opt. Soc. Am, 57, 9 pp.1105-1114 (1967).
- 21) Michael Oren and Shree K. Nayer.: "Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision.", International Journal of Computer Vision, 14, (1995) pp.227–251.
- 22) Hendrik P. A. Lensch, Jan Kautz, Michael Goesele, Wolfgang Heidrich and Hans-Peter Seidel. Image-Based Reconstruction of Spatial Appearance and Geometric Detail. In ACM Transactions on Graphics, 22(2), 2003, pp. 234–257.
- 23) 伊庭斉志,"遺伝的アルゴリズム",医学出版(東京,2002).
- 24)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.
- 25) IEC 61966-2-1: Multimedia Systems and Equipment Colour Measurement and Management Part 2-1: Colour Management Default RGB Colour Space -sRGB (IEC, 1999).
- 26) James A. Ferwerda et al.: "A psychophysically based model of surface gloss perception.", SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV, (2001) pp.291-301.

# Figure captions

- Fig. 1 Gonio spectral imaging methods. (a)Multi-band imaging. (b) Multi-illumination imaging.
- Fig. 2 Total spectral sensitivities of the multi-band system
- Fig.3 Comparison of the estimation techniques using multi-band images for oil painting.
- Fig.4 Dichromatic reflection model
- Fig.5 Simulation results of effective range of measured surface property.
- Fig.6 Automatic imaging system.
- Fig.7 Digital reproduction result of the object taken by the proposed method.
- Fig.8 Synthesized images used in the experiment
- Fig.9 Iso-gloss curves
- Fig.10 Results of gloss correction.