

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^{*}

Appearance Reproduction for Digital Museum

Norimichi TSUMURA^{*†}, Toshiya NAKAGUCHI^{*}, Kimiyoshi MIYATA^{**} and Yoichi MIYAKE^{*}

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.

Key words: spectral color reproduction, multiple regression, gonio-spectral space imaging, appearance, computer graphics

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200000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8100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¹⁾。

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製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われわれ一般の鑑賞者に対して展示しているのが現実である¹⁾。

収蔵物のデ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。デジタルアーカイブ白書2005²⁾によると、調査した1687館のうち、82.3%

(1347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みられる。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すぎない。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ひとつの原因である。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、筆者らのこれまで行った研究から、美術品

^{*} 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) [†] E-mail: tsumura@faculty.chiba-u.jp

^{**} 国立歴史民俗博物館研究部情報資料研究系 (〒285-8502 佐倉市城内町117)

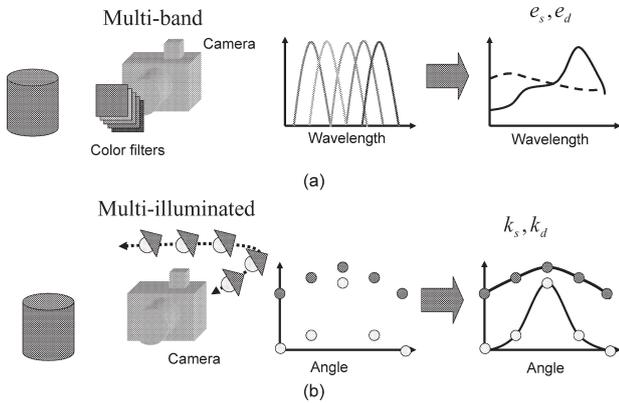


図1 偏角分光画像法。(a) マルチバンドイメージング, (b) 偏角イメージング。

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筆者らの原著論文³⁾からおもに引用した。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筆者らの原著論文⁴⁾からおもに引用した。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に掲載された筆者らの原著論文⁵⁾からおもに引用した。

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、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⁾。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、現在では図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に推定する手法^{7,8)}が主流である。現在、その推定法としてウィーナー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⁹⁾、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、筆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、図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。これまで筆者らは、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ーとして推定し、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¹⁰⁾。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ー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筆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⁴⁾。

すでに述べたように、物体の色や光沢は、照明の色や配光の影響を受ける。物体を分光反射率情報で記録することにより、さまざま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、さまざま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。

1. 分光情報に基づく正確な色再現とその効率的撮影³⁾

1.1 画像モデル

図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 $v_i(x, y)$ は、式(1)のように与えられる。

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

$$i=1, \dots, m \quad (1)$$

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 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。

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。 \mathbf{v} を m 個のバンドのセンサー応答を表した m 個の要素をもつ行ベクトル、 \mathbf{r} を物体の分光反射率を表す1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。

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{r} \quad (2)$$

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ベクトルをまとめた行列 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、1次元の分光反射率ベクトルを、行列 F により m 次元のセンサー応答ベクトル 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 v , 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 r 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、次節に述べるウィーナー推定法である。

1.2 ウィーナー推定法

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

$$E = \langle (r - \hat{r})^t (r - \hat{r}) \rangle \quad (5)$$

$\langle \ \rangle$ 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。

$$\hat{r} = Gv \quad (6)$$

このとき、式 (5) で示される平均二乗誤差を最小とする推定行列は、

$$G = R_{rr} F^t (F R_{rr} F^t + R_{nn})^{-1} \quad (7)$$

で与えられる³⁾。ここで、 R_{rr} , R_{nn} は、分光反射率、ノイズの自己相関行列を示す。

1.3 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¹¹⁾。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。

$$R = [r_1, r_2, \dots, r_n] \quad (8)$$

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_n] \quad (9)$$

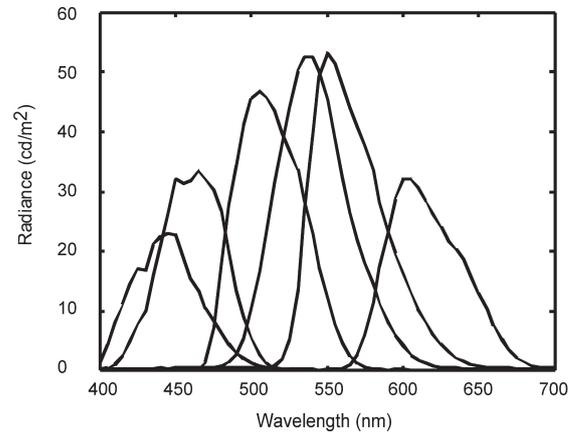


図2 マルチバンド画像システムの総合分光感度。

V を説明変数, R を目的変数とした V から R への重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。

$$G = R V^t (V V^t)^{-1} \quad (10)$$

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。このとき、式 (9) 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。

$$v_i = [v_{i,1} \dots v_{i,m}, v_{i,1} \times v_{i,1}, v_{i,1} \times v_{i,2} \dots \text{higher order terms, } \dots] \quad (11)$$

式 (11) 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 (10) から重回帰係数行列が計算される。

1.4 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、図2に示す総合的な分光積をもつシステム (デジタルカメラ 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、ウィーナー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¹²⁾を用いた。図3に、2バンドで撮影さ

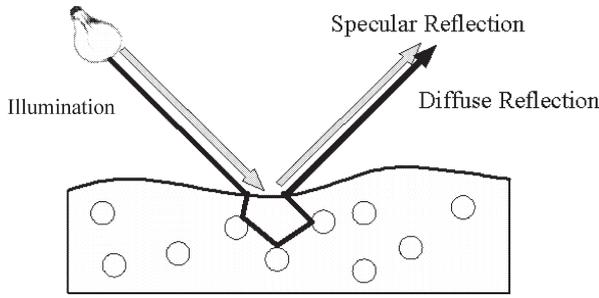


図4 二色性反射モデル。

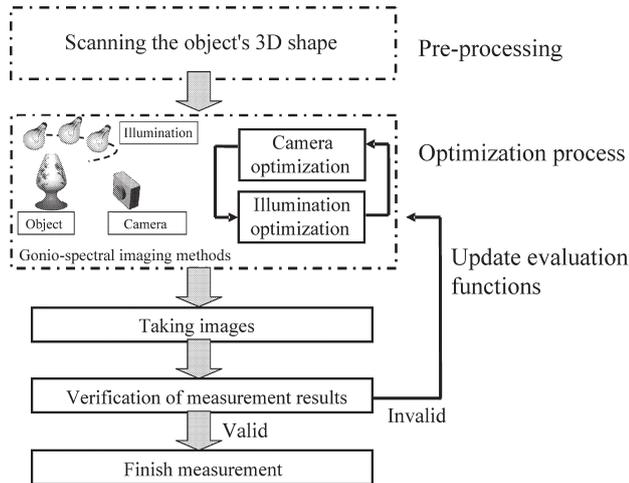


図5 照明位置・カメラ位置の最適化処理の流れ。

れたマルチバンド画像におけるウィーナー推定，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わかる．このことより，正確な分光の色再現において，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に有効な分光情報を得ることができることがわかる．

2. 適応的偏角分光画像法による効率的な光沢感記録⁴⁾

2.1 偏角分光イメージング法¹⁰⁾

物体の反射光は，図4に示す二色性反射モデル¹³⁾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．

$$f(x, y, \omega) = k_s(x, y, \omega) \mathbf{e}_s + k_d(x, y, \omega) \mathbf{e}_d(x, y) \quad (12)$$

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 θ_i ，方位角 ϕ_i と視点方向の天頂角 θ_r ，方位角 ϕ_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， $\mathbf{e}_d(x, y)$

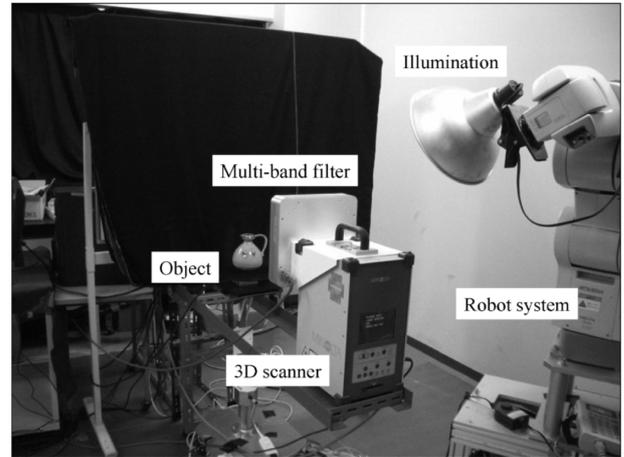


図6 自動撮影システム。

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¹⁴⁾を用いて取得することができる． $k_s(x, y, \omega)$ ， $k_d(x, y, \omega)$ 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¹⁵⁻¹⁸⁾に近似してモデル化を行うことにより，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．

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¹⁵⁾を用いる．Phong モデルは，光源の入射角と視点角度 ω における各反射光強度を次のように与える．

$$\begin{aligned} k_s(\omega) &= A_s \cos^n \alpha \\ k_d(\omega) &= A_d \cos \theta_i \end{aligned} \quad (13)$$

ここで， α は光源入射の正反射方向と視点方向がなす角度である．パラメーター 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ー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．カメラのセンサー応答ベクトル $v(x, y, \omega)$ は，以下のように表すことができる．

$$\begin{aligned} v(x, y, \omega) &= \mathbf{F}f(x, y, \omega) \\ &= k_s(x, y, \omega) \mathbf{F}\mathbf{e}_s + k_d(x, y, \omega) \mathbf{F}\mathbf{e}_d(x, y) \\ &= A_s(x, y) \cos^{n(x,y)} \alpha \mathbf{F}\mathbf{e}_s + A_d(x, y) \cos \theta_i \mathbf{F}\mathbf{e}_d(x, y) \end{aligned} \quad (14)$$

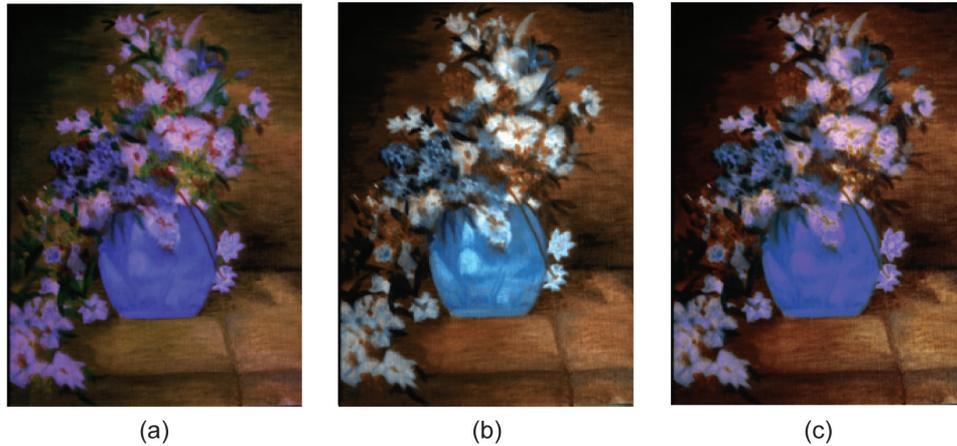


図3 マルチバンド画像を用いた油絵の具の推定結果の比較。(a) オリジナル画像, (b) ウィーナー法, (c) 高次項を含む重回帰法。



図7 周囲環境の影響を考慮したレンダリング結果。

ここで、 F は1章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、センサー応答ベクトル $v(x, y, \omega)$ から $f(x, y, \omega)$ 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二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。

2.2 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¹⁹⁾。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

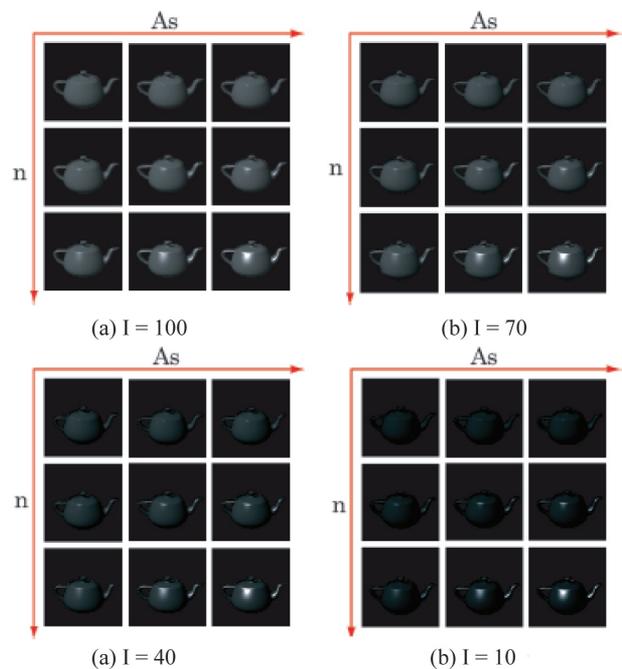


図8 光沢感定量化実験で用いた合成画像。

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、図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筆者らは提案している。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ば、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。

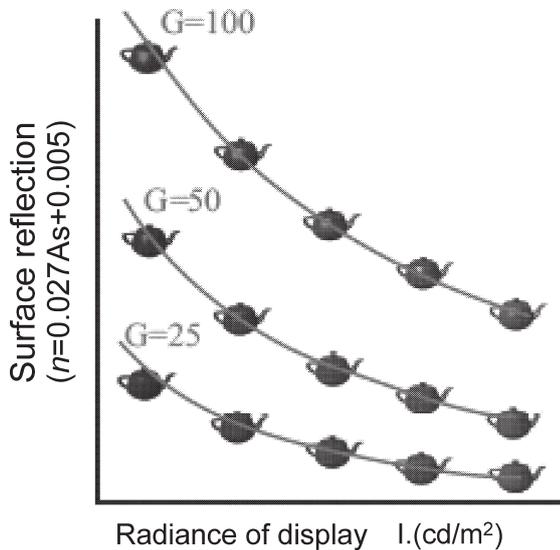


図9 等光沢感曲線.

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み合わ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 の増加とともに探索する解の組み合わせ総数は爆発的に増加するため、筆者らは、組み合わ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²⁰⁾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、文献3)を参照されたい。

2.3 再現結果

実画像へ適用するため、図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ー、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。計測結果をもとに画像を再現した結果を図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。

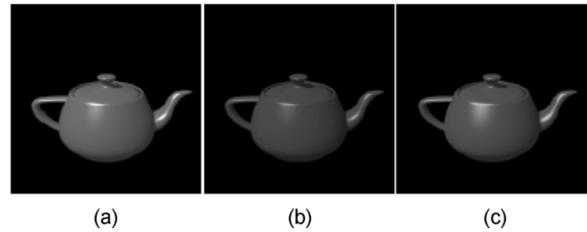


図10 光沢感補正の結果。(a) オリジナル, (b) 補正前, (c) 補正後.

3. 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、sRGB²¹⁾のように標準色空間を使用したり、ICC Profile²²⁾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。

そこで筆者らは、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、物体のも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²³⁾。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、異なる最大輝度をも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。図8に、光沢感モデルを作製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、広がり制御するパラメータ A_s 、 n を変化させている。

図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、図9に示すような等光沢感曲面 (図では曲線) を得ることができる。図9は、説明のため I 、 A_s 、 n の3次元空間の中から $n=0.027A_s+0.005$ の面を切り出して表示している。図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間の光沢感を補正した結果を示す。図10(a)は輝度の高いディスプレイに表示された原画像、図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。図10(c)は、原画像と同じ光沢感を与えるように図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 A_s 、 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。

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、物体の色と質感を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、筆者らの研究例をもとに、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さまざまな照明環境下で、かつさまざま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。これらの技術がますます精錬され、実用化され、われわれ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われわれに、人類の歴史とわれわれ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) K. Miyata: "Issues and expectations for digital archives in museums of history: A view from a Japanese museum," *Proc. Archiving Conference, IS&T* (San Antonio, Texas, April, 2004) pp. 108-111.
- 2) 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).
- 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*, **27** (1998) 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*, **61**, No. 6 (2005) 532-537.
- 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*, **58** (2004) 1324-1329.
- 6) 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.
- 7) Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, Y. Miyake, J. Hayashi and M. Saito: "A new color management system based on human perception and its application to recording and reproduction of art printing," *Proc. 5th Color Imaging Conference (IS&T/SPIE, San Jose, 1997)* p. 169.
- 8) M. Yamaguchi, R. Iwama, Y. Ohya, T. Ohyama and Y. Komiya: *Proc. SPIE*, **3031** (1997) 482.
- 9) H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura and Y. Miyake: "System design for accurately estimating the spectral reflectance of art paintings," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 6621-6632.
- 10) H. Haneishi, T. Iwanami, T. Honma, N. Tsumura and Y. Miyake: "Goniospectral imaging of three-dimensional objects," *J. Imaging Sci. Technol.*, **45** (2001) 451-483.
- 11) 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, 1982).
- 12) N. Tsumura, H. Sato, T. Hasegawa, H. Haneishi and Y. Miyake: "Limitation of color samples for spectral estimation from sensor responses in fine art painting," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 57-61.
- 13) S. A. Shafer: "Using color to separate reflection components," *Color Res. Appl.*, **10** (1985) 210-218.
- 14) 三宅洋一: デジタルカラー画像の解析・評価 (東京大学出版会, 2000).
- 15) B. Phong: "Illumination for computer-generated pictures," *Commun. ACM*, **18** (1982) 311-317.
- 16) R. L. Cook and K. E. Torrance: "A reflectance model for computer graphics," *Comput. Graphics*, **15** (1982) 307-316.
- 17) K. E. Torrance and E. M. Sparrow: "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces," *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 1105-1114.
- 18) M. Oren and S. K. Nayer: "Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision," *Int. J. Comput. Vision*, **14** (1995) 227-251.
- 19) H. P. A. Lensch, J. Kautz, M. Goesele, W. Heidrich and H.-P. Seidel: "Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail," *ACM Trans. Graphics*, **22** (2003) 234-257.
- 20) 伊庭齊志: 遺伝的アルゴリズム (医学出版, 2002).
- 21) IEC 61966-2-1: Multimedia Systems and Equipment—Colour Measurement and Management Part 2—1: Colour Management—Default RGB Colour Space—sRGB (IEC, 1999).
- 22) M. 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.
- 23) J. A. Ferwerda, F. Pellacini, D. P. Greenberg: "A psychophysically based model of surface gloss perception," *Proc. SPIE*, **4299** (2001) 291-301.

(2005年12月7日受理)