

偏角分光イメージングに基づく 高精細質感情報記録再現システムの開発

Development of High Accurate Color and Texture Imaging System
Based on Goniophotometric Method

三宅 洋一¹⁾ 羽石 秀昭¹⁾ 津村 徳道¹⁾
Yoichi MIYAKE Hideaki HANEISHI Norimichi TSUMURA
杉浦 博明²⁾ 久野 徹也²⁾
Hiroaki SUGIURA Tetsuya KUNO
林 純一郎³⁾ 石倉 一智³⁾ 千崎 岳夫³⁾ 原田 良男³⁾
Junichiro HAYASHI Kazutomo ISHIKURA Takeo SENZAKI Yoshio HARADA

- 1) 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)
- 2) 三菱電機株式会社 映像情報開発センター (〒617-8550 京都府長岡京市馬場岡所1)
- 3) 三菱電機マイコン機器ソフトウェア株式会社 (〒617-8550 京都府長岡京市馬場岡所1)

ABSTRACT. We have developed Gonio-spectral imaging software for highly accurate digital archive system. This system is consisted of multi-band digital camera, multi-angle-illuminating source of light, 3D digitizer, personal computer and CRT display. The multi-band camera is composed by five band optical filters and a monochrome type CCD area sensor. Software controls the system by three functions; Image-capture function, Image-processing function and Image-reproduce function. Image-capture function controls the image acquisition system. Multi-band image sequence is taken automatically by this function. After taking images, multi-band image sequence is corrected by using Image-processing function. Specular and Diffuse reflection component are separated by using dichromatic reflection model¹⁾, then Phong model²⁾ was introduced to represent the Gonio-photometric properties from obtained images. Image-processing function record the reflectance spectra based on gonio-photometry and 3D shape of the object. Image-reproduce function reproduces the image of the 3D object under illuminants with arbitrary spectral radiant distribution, illuminating angles, and view points are rendered by using OpenGL with 3D shape and gonio-photometric properties.

1. 背景

人類共通の資産である絵画・美術工芸品・遺跡などの文化財を保全し後世に残しておくことは極めて重要である。それ故、我が国においても多くの美術館・博物館が建設され文化財を保全・保護する事が行われるようになった。文化財はそれ自身を保全することが最も重要であるが、データベースとして完全な記録を行い電子美術館としてネットワークを介して公開することも要請されている。これまで、文化財の記録は銀塩写真フィルムで行われることが一般的であった。しかしながら銀塩フィルムでは、分光情報の記録が不可能であるほか、デジタル化のためにスキャナーが必要であり、また長期間保存による変退色や現像に伴う色再現の不安定性などが指摘されている。そこで、我々は絵画、工芸品の分光情報の記録が可能な高精細マルチスペクトルデジタルイメージングシステムを開発し、色彩においては高精細・高忠実な記録再現を実現した。

しかし文化財・美術品が物語る芸術性をデジタル画像により再現するためには、質感の忠実な再現等いくつかの課題が残されている。そこで、本開発では過去の成果に加え、光沢情報や3次元分光情報の記録再現技術の開発を行い、総合的に人間が観測した場合に違和感のない美術品立体モデルの再現を実現する。

2. 目的

本研究開発では、文化財・美術品の高精細・高忠実なデジタル化による永年記録（デジタルアーカイブ）を目的とし、「マルチバンド撮影法」+「偏角分光測光法」による、色彩・光沢を含めた「質感情報」の記録再現技術の開発、デジタル画像の品質を飛躍的に向上させる記録再現システム（デジタルアーカイブシステム）の開発により美術館・博物館関係者の高度な要求を満足する美術品文化財のデジタル記録を行う。また、人間の視覚特性を考慮し美術品・文化財の形状及び質感を忠実に鑑賞できる再現システムを構築する。

偏角分光測光によって記録される3次元分光情報は物体固有の色情報である。従って真の意味のデバイスインデペンデントであり、次世代の画像情報通信分野への応用が期待できる。すなわち、光沢、高精細色情報、3次元テクスチャーの記録、伝送、再現は美術工芸品だけでなくインターネットミュージアム、インターネットショッピング、遠隔医療など色情報が重要な新しい産業分野への基盤技術であり、これら成長著しい分野のビジネスプロセスの革新をも期待できる。

3. 質感情報の調査研究

(1) 質感構成要素調査研究

質感を構成する物理パラメータとして、物体の分光反射率および偏角特性を測定する。試料を2色性反射モデルで定義し、物体表面と空気層の境界で反射する表面反射光と物体表面を通過して色素粒子により散乱される内部反射光を測定する。測定は質感の異なるサンプル試料に対し、試料面の向きを変化させ分光放射輝度を測定した。2色性反射モデルでは光源の角度 θ のときの分光放射輝度 $f(\theta)$ は式1で表される。

$$\begin{aligned} f(\theta) &= f_s(\theta) + f_d(\theta) \\ &= k_s(\theta)\mathbf{e}_s + k_d(\theta)\mathbf{e}_d \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $k_s(\theta)$ 、 $k_d(\theta)$ はそれぞれ表面反射光、内部反射光成分の強度、 \mathbf{e}_s 、 \mathbf{e}_d は表面反射光、内部反射光成分の色を表す単位ベクトルである。

3次元物体の様々な角度からの画像を再現するためには、光源の角度により連続的に変化する物体の反射光強度を記録する必要がある。測定した光源角度における反射光強度から光源の角度をパラメータとする Phong モデルの式2を用いて離散データを近似することにより任意の光源角度における反射光強度を推定する事が可能となる。

$$\begin{aligned} \tilde{k}_s(\theta') &= A_1 \cos^{A_3}(\theta' - A_2), \\ \tilde{k}_d(\theta') &= B_1 \cos(\theta' - B_2) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 A_1, A_2, A_3, B_1, B_2 は Phong モデルのパラメータであり、離散的な反射光強度との2乗誤差が最小となるように決定される。

図1に赤い油絵具の表面反射光と内部反射光の分離前の分光放射輝度分布、図2に Phong モデルで近似した表面反射光と内部反射光の強度分布を示す。

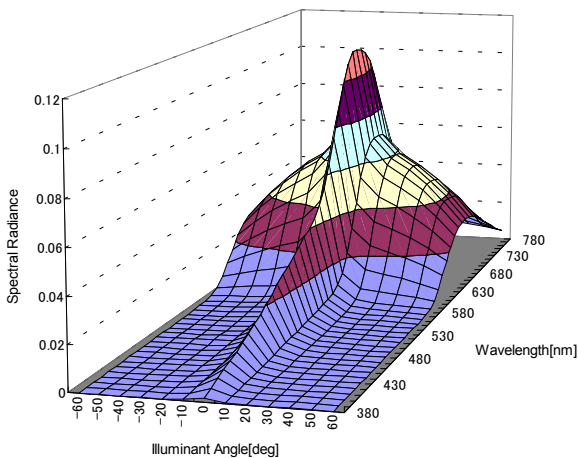


図1 分離前の分光放射輝度分布

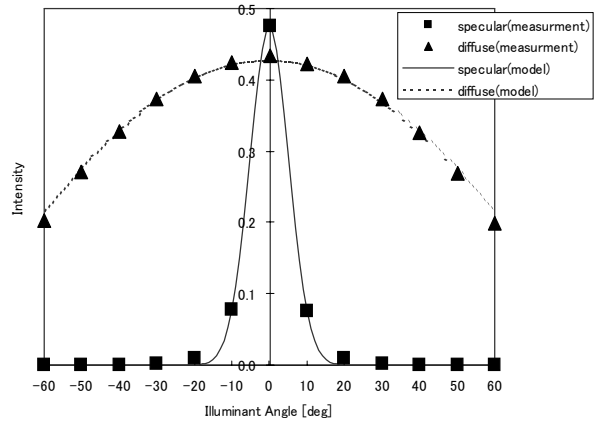


図2 分離後の表面反射光と内部反射光の強度分布

図3、図4に13種類の質感の異なる素材を測定し分離した反射強度を、Phong モデルで近似した Phong モデルのパラメータ (A_1 : 表面反射光強度、 A_3 : 表面反射光尖度)を示す。

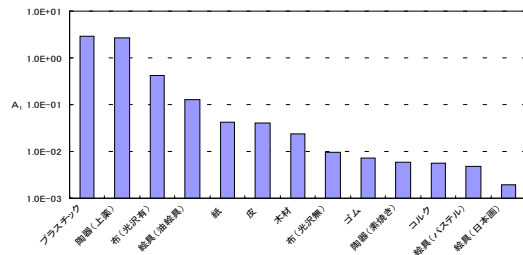


図3 素材の違いによるパラメータの変化
 A_1 : 表面反射光強度

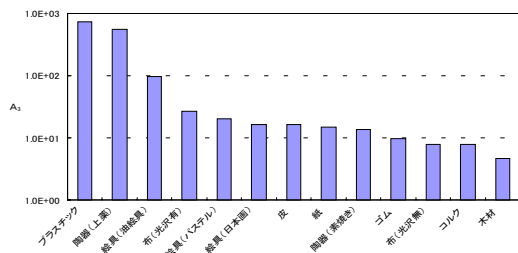


図4 素材の違いによるパラメータの変化
 A_3 : 表面反射光尖度

以上により質感が異なるサンプルで特徴的なパラメータを確認する事が出来た。次にこのアルゴリズムを実際の画像に適用する。先に述べた2色性反射モデル(式1)のパラメータ \mathbf{e}_s 、 \mathbf{e}_d は分光データであり、RGBデータに比べ、非常に高次元である。そこで本開発では、マルチバンド撮影法をもちいて、光源の角度を変化させて撮影を行い光源角度毎の分光データを取得する。図5に画像の再現例を示す。



表面反射光のみ



内部反射光のみ



表面と内部の合成

図5 画像の再現例

(2)主観評価実験

質感情報の調査研究で得られた物理パラメータと人間が感じている質感について、主観評価実験を行い、その関連性を調査した。

実験に用いるサンプルとして、美術品・文化財に使用されている素材を中心として以下の13種類のものを選定した。

陶器（上薬、素焼き）、絵具（油絵具、日本画絵具、パステル）、木材、紙、布（光沢有、光沢無）、皮、ゴム、プラスチック、コルク

素材の質感を表現する評価用語としては、実際のサンプルを見て受けた印象やその反対語を抽出し、類似する用語についてはそれらを代表するなるべく一般的な用語を選択し表1に示される24対の用語を選定した。

表1 評価用語対

固いー柔らかい	大きいー小さい
新しいー古い	自然なー不自然な
厚いー薄い	水彩的ー油彩的
細かいー粗い	淡いーけばけばしい
重いー軽い	乾いたー湿った
明るいー暗い	派手なー地味な
印象の薄いー印象的な	輝きが鋭いー輝きが鈍い
金属的なー非金属的な	弾力のあるー弾力のない
光沢のあるー光沢のない	好ましくないー好ましい
具体的なー抽象的な	つるつるしたーざらざら
透明なー不透明な	現実感があるー現実感がない
さらさらーねばねば	奥行きのないー奥行きのある

まず、各実物サンプルを観察し選定した用語対により5段階で評価した。主観評価値と物理パラメータの関係の一例（光沢のあるー光沢のないの主観評価値と A_1 ：表面反射強度の関係）を図6に示す。次に、サンプルを撮影し画像の物理パラメータを変化させ同一素材により同様に用語対により評価した。評価結果と物理パラメータの関係の一例（ A_1 ：表面反射光強度及び B_1 ：内部反射光強度を変化させた場合の光沢感の印象変化）を図7に示す。実験により、光沢に関連した質感はPhongモデルのパラメータと相関が高いことが判った。しかし、「つるつるーざらざら」など物体表面の粗さに関する質感は相関があまり見られず、Phongモデル以外のパラメータで評価する必要がある。

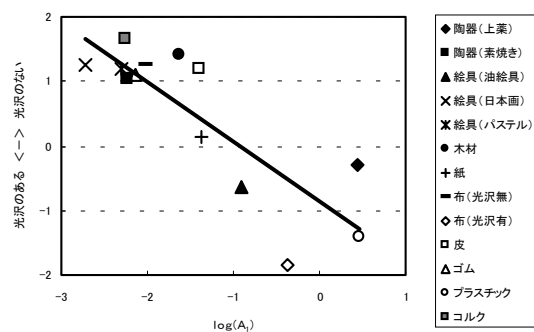


図6 主観評価値と物理パラメータの関係

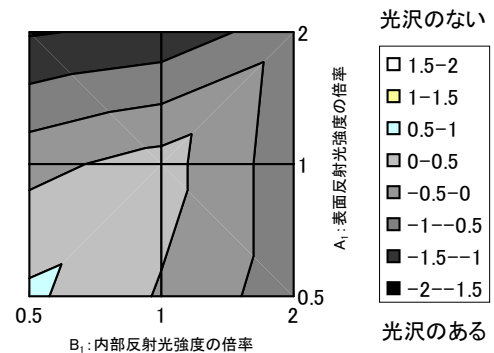


図7 評価結果と物理パラメータの関係

(3)表面の粗さに関する質感パラメータ

主観評価実験で、物体表面の粗さに関する質感がPhongモデルのパラメータだけでは表現出来ていないため、これらのパラメータを含む反射モデルに基づき、面の粗さを表すパラメータ σ などを求める。反射モデルとして、表面反射成分にTorrance-Sparrowモデル、内部反射成分にOren-Nayarモデルを適用する。すなわちTorrance-Sparrowモデルでは、物体の表面はV字型の微小面からなり、その傾き分布はガウス分布に従うと仮定し、サンプル表面の隣接した小面によって影が生じる場合や遮蔽する場合の影響を考慮している。Oren-Nayarモデルでは、小面の傾きの標準偏差 σ 、小面の反射率 ρ 、光源・視線方向を示す (θ_i, ϕ_i) 、 (θ_r, ϕ_r) の関数として、内部反射成分を式3のように定義している。

$$L_d(\theta_r, \theta_i, \phi_r - \phi_i; \sigma) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \cos\theta_i [C_1(\sigma) + \cos(\phi_r - \phi_i) C_2(\alpha; \beta; \phi_r - \phi_i; \sigma) \tan\beta + (1 - |\cos(\phi_r - \phi_i)|) C_3(\alpha; \beta; \sigma) \tan\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)] \quad (3)$$

$$\alpha = \max[\theta_r, \theta_i], \beta = \min[\theta_r, \theta_i]$$

C_1, C_2, C_3 、各パラメータによって決定される係数である。

σ, ρ, k_d は未知パラメータであるが、ジオメトリを様々に変化させて得られた放射輝度の実測値にモデル式をフィッティングして求めることができる。

図8のようにロボットアームによって試料面の向きを変化させ、169個の視線・光源方向からの放射輝度を測定した。各パラメータを推定した結果を表2に示す。実験により、 σ の値の変化と、実際のサンプルの粗さが対応していることが確認できた。

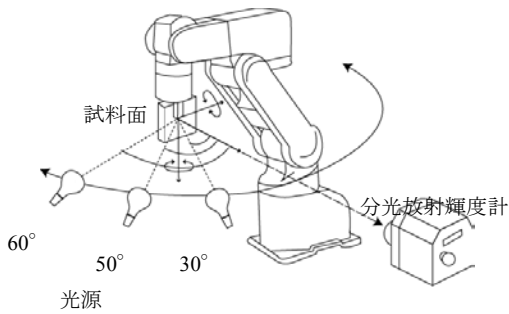


図8 測定ジオメトリ

表2 パラメータ推定結果

試料	σ	ρ	k_d
コンクリート	0.26	0.11	0.99
タイル	0.09	0.34	0.99
コルク	0.49	0.29	0.95
レンガ	0.43	0.36	0.97

また、質感が異なるサンプルで特徴的な反射光分布が測定できた。さらに、試料の粗さを示すパラメータ σ を抽出することができた。今後このモデル式のパラメータ σ, ρ, k_d を物理的評価基準とみなし、主観評価実験を行い、質感との関係性を明らかにする予定である。

(4) 色・光沢成分の推定精度向上

実際の撮像系では、直接照明だけではなく、シーン以外の表面に反射した光が対象物体に入射する周辺光が存在する。影にならない画素では直接照明が周辺光より十分に大きいため、パラメータ推定の誤差を無視できるが、影になる画素では直接照明がないため、その誤差が顕著に現れる。そこで本研究では、このような周辺光の特性を検討し、そのモデル化を行った。周辺光の色は、様々な表面に反射された光であるため、全ての画素において同一色であると考えられる。そこで本研究では、「周辺光は全画素で同じ色である」、「周辺光の色は画像中の影になっ

ている画素のマルチバンド画像を用いる」と仮定することにより、式4のようにマルチバンド画像を3成分の線形結合で表す。

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, \theta) = k_s(\mathbf{r}, \theta) \mathbf{e}_s + k_d(\mathbf{r}, \theta) \mathbf{e}_d(\mathbf{r}) + \mathbf{v}_{\text{ambient}} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{v}_{\text{ambient}}$ はマルチバンド画像の周辺光成分である。

周辺光を考慮すると、光源角度 θ に対する放射輝度は周辺光によるバイアス加わるため、直接照明されていない場合でも放射輝度はある一定の値をもつことになる。

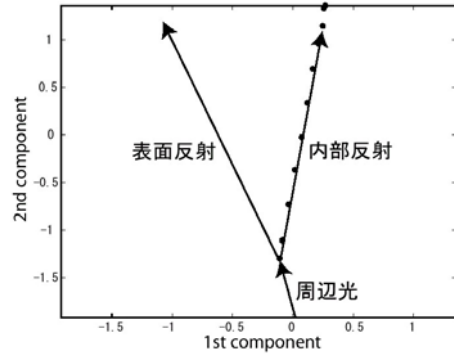


図9 マルチバンド画像の分布

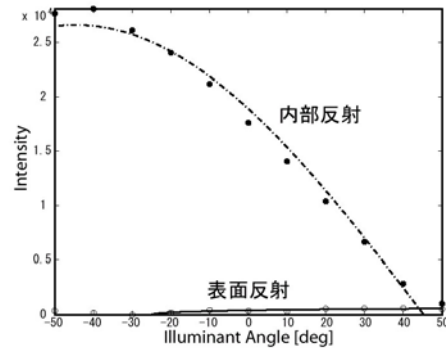


図10 k'_s, k'_d の推定結果

実際に撮影した画像から周辺光成分を抽出し、周辺光を考慮したパラメータ推定を行った。このときのベクトル空間におけるマルチバンド画像の分布を図9に示す。影になるマルチバンド画像が周辺光成分として推定されることにより、表面・内部反射成分が正確に得られていることが確認された。また図10に示すように、影になる画素では、表面反射強度 k'_s がほぼ0となり、内部反射強度 k'_d も正確に推定されている。以上の様に、撮影時に影になる画素で分光反射率の推定精度が大幅に向上することが確認できた。

4. ソフトウェア開発

(1) 美術館・博物館のニーズ調査研究

システム設計の為の要求調査として美術館・博物館のニーズ調査を行った。現在、美術館・博物館でのデジタルアーカイブの方法は、銀塩写真により撮影しフィルムのフォトCD化を行うのが一般的である。デジタルデータの利用としては、ディスプレイでの鑑賞用のほか、印刷への利用が大きなウェイトを占めており、一つのデータから多目的な利用が望まれている。フォトCDの画像スペックに対しては、満足している研究者もいるが、8×10インチのような大きなサイズのフィルムの使用者は解像度等に不満があり、より高精細なデータを望む声が聞かれた。また、データとしては従来の2次元画像だけではなく、2次元画像から写真測量などの手法により3次元形状情報も合わせて保存したいという意見もあった。

操作性として、撮影は美術館・博物館の写真撮影専門家が行うため、従来の銀塩写真と同じ方法による操作が望ましい。撮影後のデータ処理の部分については、現在はフォトCDのように外部に委託しているため、バッチ処理の様に処理工程のみを指定し自動で保存用のデータまで作成を行うようにし、操作の手間を省く必要がある。再現に関しては、館内での高精細な展示の他、インターネットによる配信など、データ量を含めた数段階の表示方法に対応する必要がある。データの鑑賞方法に関しては、主なユーザーが美術館・博物館の来館者となり、実物については展示されているものを直接動かして自由に見ることが出来ないため、デジタルによる鑑賞方法としてはそれを補うため来館者がインタラクティブに回転や拡大を行って鑑賞できるようにすることが必要である。ユーザーインターフェイスについてもキーボードによる複雑な操作ではなく、簡便なインターフェースの開発が望まれている。

(2) システム概要

質感情報の調査研究及び、美術館・博物館ニーズの調査研究の結果からシステムの基本設計及びソフトウェアの要求仕様作成を行った。開発した偏角分光イメージングシステムのシステムイメージを図11に示す。システムは被写体に対する光源の位置を変化させ、異なる角度からの反

射光を複数のフィルターを順次切り換えてデジタルカメラで撮影した画像データから、色彩情報と光沢情報からなる質感情報を抽出、さらに被写体の形状情報と合成し保存、保存したデータから質感を高忠実に再現する画像をディスプレイに表示させるシステムである。

次に本システムに搭載するプロトタイプソフトウェアの概要を図12に示す。プロトタイプソフトウェアは偏角マルチバンド撮影機能、立体モデル情報生成機能、美術品再現シミュレーション機能からなり、美術品・文化財等の被写体をデジタルカメラを用いて偏角マルチバンド撮影方式により撮影した画像情報ファイルと、被写体をポリゴンで表現した形状情報ファイル、色彩計などを用いて測定した光源、デジタルカメラ等の色彩情報ファイルを入力情報として、撮影機器や撮影環境に依存しない被写体の色彩、光沢を含めた質感情報と形状情報を合成した立体モデル情報ファイルをデジタルアーカイブのための保存情報として出力する。立体モデル情報は、プロトタイプソフトウェアによりディスプレイに表示可能な画像データに変換し、鑑賞する。

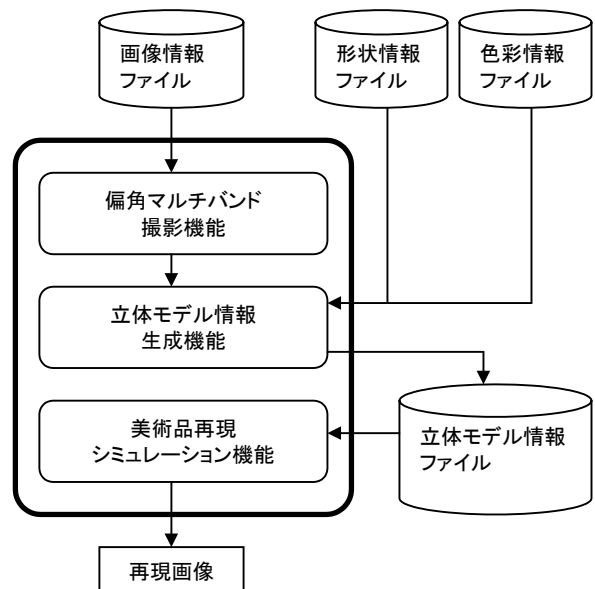


図12 ソフトウェア概要

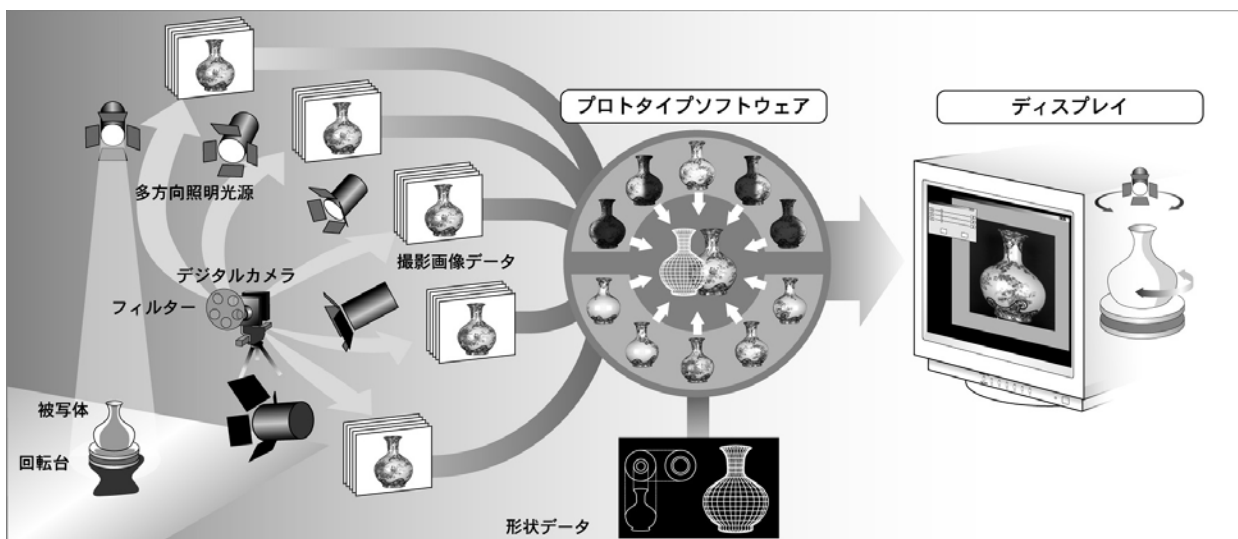


図11 システムイメージ

(3) 偏角マルチバンド撮影ソフトウェア

偏角マルチバンド撮影ソフトウェアでは、異なるフィルター異なる照明角度による大量の画像を正確に撮影するため、「撮影補助機能」、「撮影画像評価機能」、「画像管理機能」の3つの技術開発を行った。

「撮影補助機能」の開発では、撮影の際に行う予備撮影の画像を分析しフォーカス、露出、撮影位置などが適切かを確認する技術開発を行った。フォーカスの確認では画像の鮮鋭度を数値化、露出の確認では画像内のグレースケールを指定することにより階調特性をグラフ表示、撮影位置の確認では画像内の被写体の傾きを表示する機能を実現した。

「撮影画像評価機能」の開発では、撮影した後の画像を分析し光量変動やカメラブレが無く正常に撮影されているか確認するため、光量変動の場合は全ての撮影画像から同一位置の画素情報を抽出、カメラブレの場合は全ての撮影画像からマーカー位置を自動認識して表示し、変動量の大きい画像を自動判別し警告表示を行うようにした。

偏角マルチバンド撮影ソフトウェアの撮影補助機能、撮影画像評価機能のサンプル画面を図13に示す。

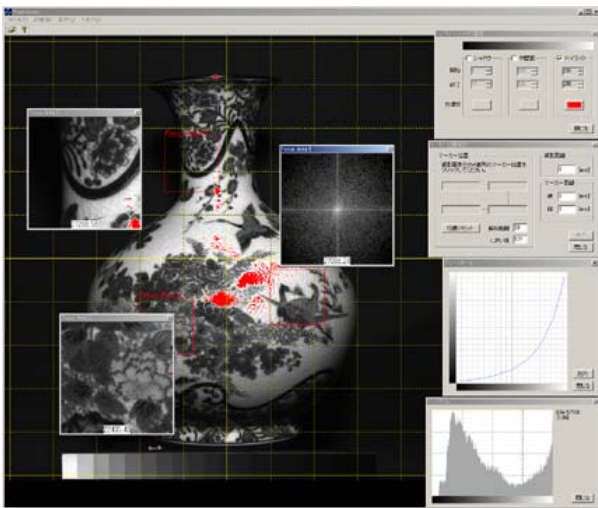


図13 偏角マルチバンド撮影ソフトウェアの画面例(撮影補助機能、撮影画像評価機能)

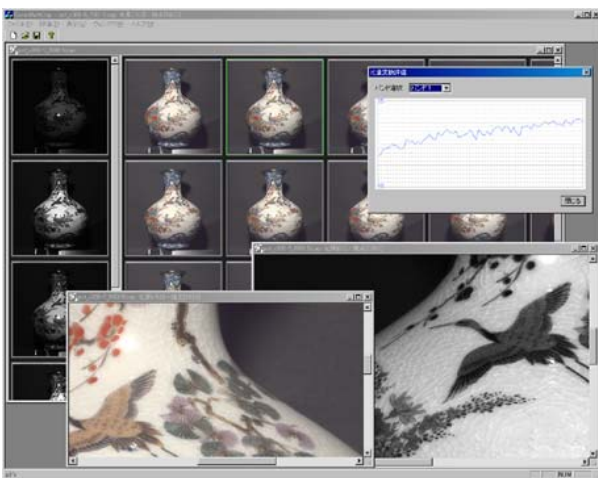


図14 偏角マルチバンド撮影ソフトウェアの画面例(画像管理機能)

「画像管理機能」の開発では、大量の画像を効率良く管理するため、画像管理のフォーマットの検討と画像を簡易的に確認する技術について開発を行った。画像管理では全画像ファイルのファイル名を一定の規則に基づき一括変換し、さらにファイル名と撮影条件とのリンク情報を生成することにより管理する。画像の確認では、各画像を撮影したフィルター特性等からRGBデータへの変換式を作成し簡易的なRGB画像を表示した。

偏角マルチバンド撮影ソフトウェアの画像管理機能のサンプル画面を図14に示す。

(4) 立体モデル情報生成ソフトウェア

立体モデル情報生成ソフトウェアの開発では撮影された画像から、最終的な保存を目的とした立体モデル情報を生成するため、「撮影画像補正機能」、「質感情報抽出機能」、「形状情報合成機能」の3つの技術開発を行った。

「撮影画像補正機能」の開発では、撮影画像に含まれるデジタルカメラの暗電流特性や階調特性、及び撮影時の照明の変動の補正を行う技術開発を行い、それぞれ暗電流補正機能、ガンマ補正機能、光量バラツキ補正機能としてソフトウェアに搭載した。またこれらの補正は単一画像だけでなく各フィルター、各照明角度の画像へ一括して行える。

「質感情報抽出機能」では、前述の補正を行った画像から表面反射光、内部反射光を分離する技術及び、表面反射光は光沢成分、内部反射光は色彩成分として処理し、光沢成分についてはさらに表面反射モデルにフィッティングしモデルパラメータとして質感情報を抽出した。

「形状情報合成機能」では、2次元情報である質感情報と3次元情報である形状情報とのリンク情報を生成し、それらを全て合わせて立体モデル情報を生成する技術開発を行った。2次元画像情報と3次元形状情報のリンク情報の生成では、それぞれの情報から特徴点をサンプリングし、3次元形状情報のすべての頂点に対応した2次元画像座標への投影マトリックスを生成した。

立体モデル情報生成ソフトウェアのサンプル画面を図15に示す。

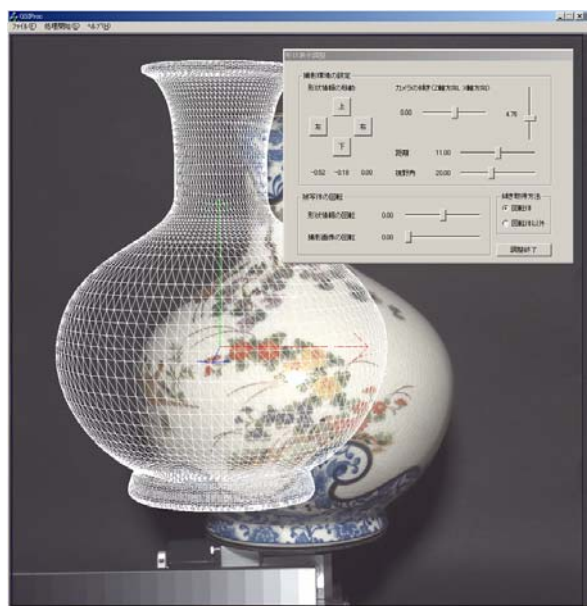


図15 立体モデル情報生成ソフトウェアの画面例

5. 美術品再現シミュレーションソフトウェア

美術品再現シミュレーションソフトウェアの開発では、色彩及び光沢が高忠実に再現された質感画像を表示するため、「再現画像生成機能」、「再現画像補正機能」、「表示制御機能」の3つの技術開発を行った。

「再現画像生成機能」の開発では、立体モデル情報データから表面反射成分、内部反射成分をそれぞれの反射特性のパラメータに基づき合成し分光反射率を推定、被写体に照射される光源の分光分布データによりXYZデータに変換後、RGB形式に再変換して表示を行うようにした。

「再現画像補正機能」の開発では、ディスプレイや再現光源の色特性を測定し、測定結果のデータより表示画像データを補正するため、再現画像をXYZデータからRGBデータに変換する変換マトリックスを、ディスプレイの色特性に応じて変更するようにした。

「表示制御機能」の開発では、生成した再現画像のスムーズな光源の移動、視線の移動を可能とするため、各光源、視線方向に対応した全ての画像を予め生成し、高速に表示を切り替える事により人間が見て違和感のない表示を実現した。

美術品再現シミュレーションソフトウェアのサンプル画面を図16に示す

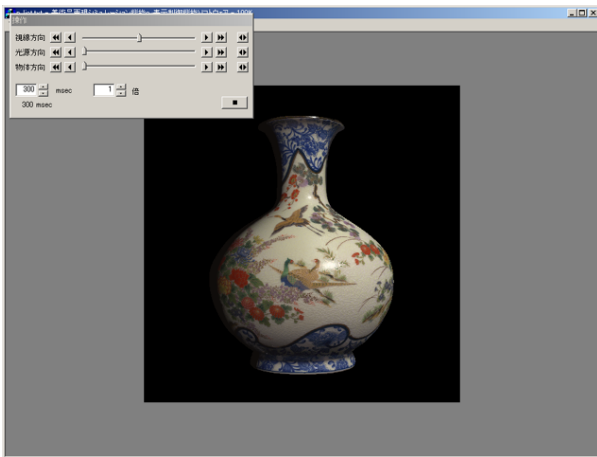


図16 美術品再現シミュレーションソフトウェアの画面例

5. まとめ

本開発により、偏角マルチバンド撮影による大量な画像の正確な撮影と管理を行う方法を確立し、撮影した画像データより質感情報を抽出し、立体情報と合成することにより色彩、光沢とも実測及び主観評価実験により高忠実に再現されていることを確認した。また、再現画像では、ユーザーの指示により光源、視線方向を変更し美術品文化財等の質感を自由に鑑賞出来るようにした。

今後は、プロトタイプソフトウェアを元に、撮影枚数の削減や処理時間の短縮、より多様な素材への対応など基本性能の向上の他、質感情報の記録再現を必要とする電子美術館（インターネットミュージアム）や電子商取引、遠隔医療などの分野に向けて、それぞれの用途に特化した改良により製品化を進めて行く。

6. 参加企業及び機関

本プロジェクトに参加した企業及び機関は以下の通りである。

千葉大学工学部三宅研究室
三菱電機株式会社映像情報開発センター
三菱電機株式会社情報技術総合研究所
三菱電機マイコン機器ソフトウェア株式会社

7. 参考文献

- [1] Y.MIYAKE: Invited Talk, Development of Multi-spectral Imaging System at MIYAKE Laboratory in Chiba University, Third International Symposium on Multi-spectral Imaging and Color Reproduction (Joensuu, Finland, June 18-20)
- [2] Y.MIYAKE: Invited Talk, Development of Gonio-photometric Imaging System for Reflectance Spectra of 3-D Object (AIC, Color 01, Rochester June 24-28)
- [3] F.H.Imai, N.Tsumura and Y.Miyake: Perceptual Color Difference Metric for Complex Images Based on Mahalanobis Distance, J.Electronic Imaging, 10(2)385-393(2001)
- [4] 三宅洋一: マルチメディアの色彩工学—総論—, 映像情報メディア学会誌, 55(10)1216-1221(2001)
- [5] 三宅、宮田、津村、林: デジタルアーカイブを目的としたデジタルイメージングシステム—現状と課題, 日本写真学会秋季大会 招待講演, 11.21(京大, 2001)
- [6] H.Haneishi, T.Iwanami, T.Honma, N.Tsumura and Y.Miyake: Goniospectral Imaging of Three-Dimensional Objects, J.Imaging Science and Technology, 45(5)450-457(2001)
- [7] 三宅洋一: 分光画像とその応用,(招待講演)、日本光学会創立50周年記念大会論文集、41-42(早稲田大学, November 5, 2001)
- [8] 近藤、津村、三宅: 視覚特性に基づく圧縮画像の画質評価と適応的量子化への応用, 日本写真学会誌, 64(6)343-351(2001)
- [9] Hideto Shimizu, Keiji Uetsuki, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Nobutoshi Ojima, " Analyzing the effect of cosmetic essence by independent component analysis for skin color images," Proceedings of the third international conference on multispectral color science, pp.65-68 (2001, June, Joensuu, Finland).
- [10] Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Francisco H. Imai, " Medical Vision: measurement of skin absolute spectral-reflectance image and the application to component analysis," Proceedings of the third international conference on multispectral color science, pp.25-28 (2001, June, Joensuu, Finland).
- [11] K.Tonsho, Y.Akao, N.Tsumura and Y.Miyake: Development of Gonio-photometric Imaging System for Recording of Reflection Spectra of 3-D object, Proc.SPIE (San Jose, Jan. 2002)