

質感工学の博物館応用

Appearance Reproduction and Its Applications to Digital Museum

津村徳道

TSUMURA Norimichi

- ①はじめに
- ②分光情報に基づく正確な色再現とその効率的撮影
- ③質感工学のフレームワークと分光画像
- ④複合現実感を利用した応用事例
- ⑤おわりに

【論文要旨】

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、研究用に用いられているが、一般の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。本論文では、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を提案する。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。

【キーワード】 デジタルアーカイブ, 色, 質感, 記録, 再現

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。博物館では研究用に熟覧することを可能であるが、一般の人々には収蔵物の多くは鑑賞することが困難であり、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]。このような大きなサイクルで眠っている収蔵物を後世に引き継ぎかつ鑑賞させる手法としてデジタルアーカイブがあり、色と質感を取り扱う画像応用技術の発展が大きく期待されている。

収蔵物の展示サイクルとは大きく話しが変わるが、一方では近年、製造業では商品の開発サイクルが短くなり、また消費者の個性的な嗜好の変遷を反映した商品の提供が求められている。この時、商品の色や質感は、商品の印象を大きく左右する重要な要素の一つである。開発段階においては、色や質感は、形状と同様に、数値的な値ではなく実際に物体を観察することでのみ評価されることが多い。形状に関しては、モックアップを作成したり、コンピュータグラフィックスにより表示したりすることにより、試作前にある程度評価は可能である。しかし、色や質感に関しては、その表示デバイス依存性、照明環境依存性や、色や質感の正確な表現技術の未成熟さ等から試作前の評価は困難であり、開発サイクルにおけるボトルネックとなっているケースが多い。したがって、商品の色や質感を予測し、人間の目に観察される画像として正確に再現することが現在求められている。さらに、異なる場所（地域）に所在を持つセクションが、ネットワークを介して協調し、商品開発を短いサイクルで実現するためには、ネットワークを介した色や質感の正確な伝送が必要となる。色や質感は観察者の照明などの環境に大きく依存するため、異なる環境下間の色や質感の正確な再現が求められている。異なる環境下間の正確な色再現のために、分光画像等を用いた記録・再現方法が開発されている [2-13]。物体の各点の分光反射率を、マルチバンドカメラにより計測することにより、任意の照明下の正確な三刺激値を計算することができる。マルチバンドカメラでは、通常5つ以上のカラーフィルタをモノクロ CCD カメラの前に回転フィルタとして用いて撮影し、得られたマルチバンド画像から各点の分光反射率を推定する。一方、色は物体の質感に対する一属性に過ぎない。光沢感、粒状感や透明感などの他の属性も実用的な異なる環境下間の質感の再現システムを考慮する必要がある。これらの問題を解決すべく筆者らは質感の正確な記録、再現、合成を目指した質感工学に関する研究を行っている。質感工学は、博物館応用にも寄与すると期待される。

そこで、本論文では、まず2章において、この質感工学（色や質感）における重要要素技術となる分光画像を用いた手法を述べる。さらに、3章において、分光画像と質感工学の係わり合いとともに質感工学のフレームワークを述べる。さらに、4章においてこの質感工学のフレームワーク内である複合現実感（コンピュータグラフィックスと実世界の融合）を博物館における電子資料閲覧に適応した例を示す。

②……………分光情報に基づく正確な色再現とその効率的撮影

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 [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]、本節では、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、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 [13]。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

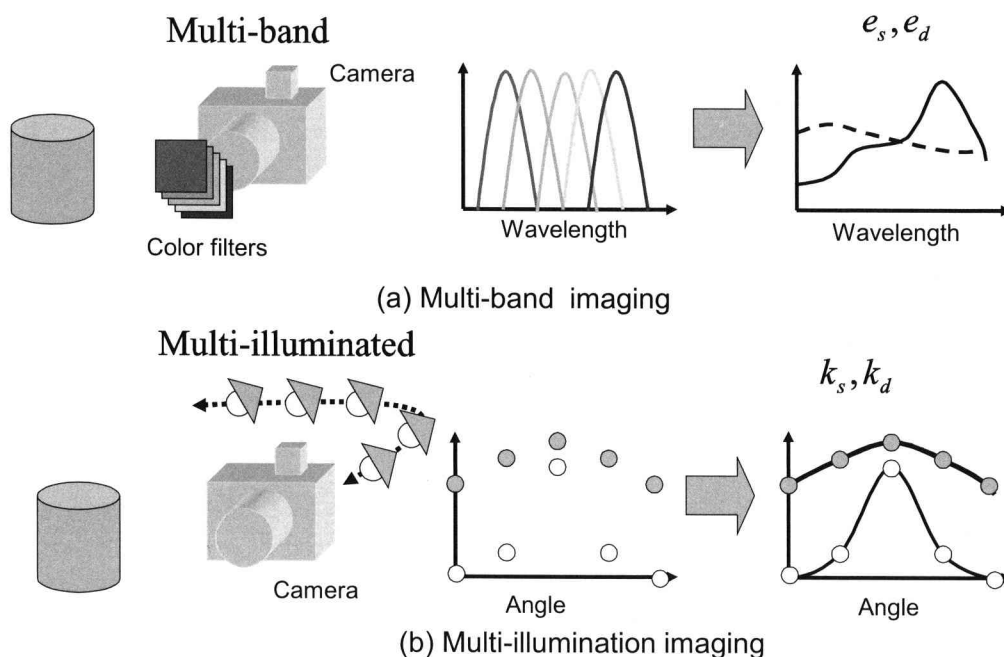


図1 偏角分光画像法 (a) マルチバンドイメージング, (b) 偏角イメージング

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 [3]。

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受ける。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。本論文では、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述べる。

2.1 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。

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

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 個の要素を持つ行ベクトル、 \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 \mathbf{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 \mathbf{T}

$$\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_m]^T \quad (3)$$

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 \mathbf{E}, \mathbf{S} を用いて、以下のように定義される。

$$\mathbf{F} = \mathbf{T} \mathbf{E} \mathbf{S} \quad (4)$$

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 \mathbf{F} により m 次元のセンサ応答ベクトル \mathbf{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 \mathbf{v} 、別に測定されたカメラ特性 \mathbf{F} を用いて、式(2)を分光反射率ベクトル \mathbf{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、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 $\hat{\mathbf{r}}$ の間の平均二乗誤差 E を、以下のように表す。

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

$\langle \rangle$ 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。

$$\bar{\mathbf{r}} = G\mathbf{v} \quad (6)$$

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、

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

で与えられる [14]。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。

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

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。

$$R = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n] \quad (8)$$

$$V = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n] \quad (9)$$

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。

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

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。この時、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。

$$\mathbf{v}_i = [\mathbf{v}_{i,1} \dots \mathbf{v}_{i,m}, \mathbf{v}_{i,1} \times \mathbf{v}_{i,1}, \mathbf{v}_{i,1} \times \mathbf{v}_{i,2} \dots \text{higher order terms}, \dots] \quad (11)$$

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) から回帰変数行列が計算される。

2.4 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持つシステム (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 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 [15] を用いた。図

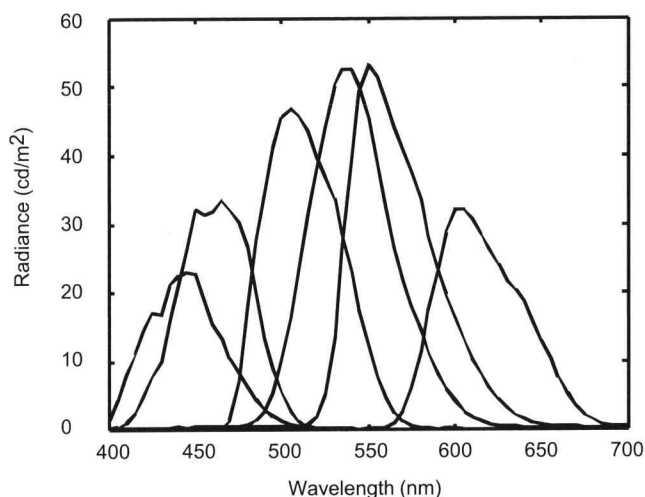


図2 マルチバンド画像システムの総合分光感度

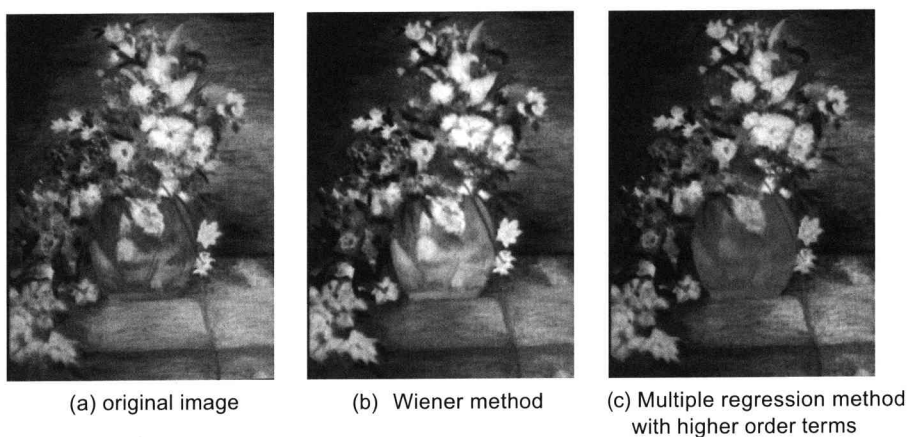


図3 マルチバンド画像を用いた油絵の具の推定結果の比較

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 Wiener 推定に基づく手法よりオリジナルに近い再現が行われている。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の有効な分光情報を得ることができるとわかる。

2.5 適応的偏角分光画像法による効率的な光沢感記録

2.5.1 偏角分光イメージング法[13]

物体の反射光は図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。

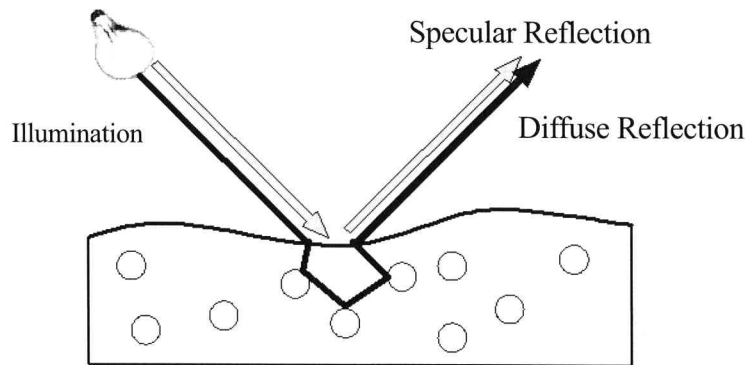


図4 二色性反射モデル

$$f(x, y, \omega) = k_s(x, y, \omega) e_s + k_d(x, y, \omega) e_d(x, y) \quad (12)$$

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、 e_s は表面反射光成分の色を表す単位ベクトル、 $e_d(x, y)$ 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 e_s は標準白色板を撮影することで得られ、 $e_d(x, y)$ 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 e_s と $e_d(x, y)$ 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 [18] を用いる。Phong モデルは、光源の入射角と視点角度における各反射光強度を次のように与える。

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

ここで、 a 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 $v(x, y, \omega)$ は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} v(x, y, \omega) &= Ff(x, y, \omega) \\ &= k_s(x, y, \omega) Fe_s + k_d(x, y, \omega) Fe_d(x, y) \\ &= A_s(x, y) \cos^{n(x, y)} a Fe_s + A_d(x, y) \cos \theta_i Fe_d(x, y) \end{aligned} \quad (14)$$

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 $v(x, y, \omega)$ 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。

2.5.2 適応的な照明方向, カメラ方向のサンプリング [3]

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 [22]。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、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ばこの時点で計測が終了する。ただ、この妥当性は経験的なしきい値により決定した。以上により、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。

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。

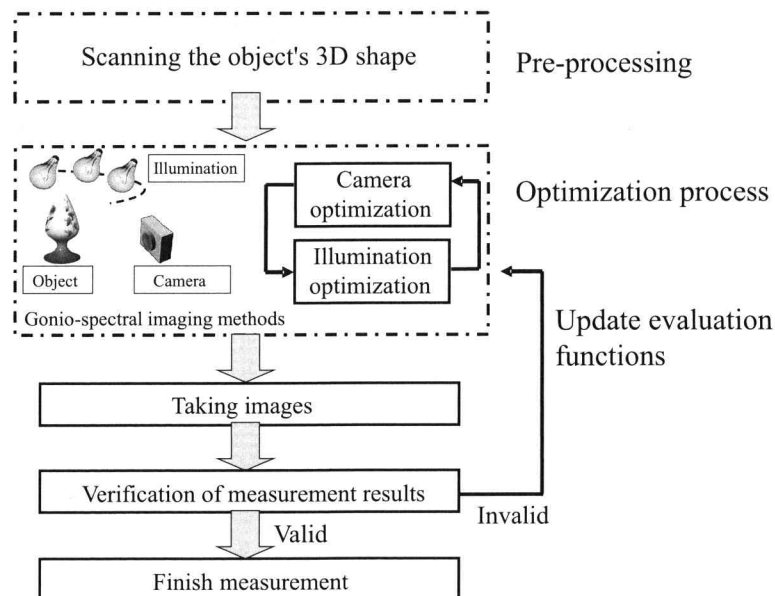


図5 照明位置・カメラ位置の最適化処理の流れ

2.5.3 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、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。マルチバンドカメラを使うことによってマルチバンド画像が常に撮影される。また、照明光源を移動させる毎にマルチバンド撮影を行った。これらの複数のマルチバンド画像と3D形状データによる計測結果を元に、博物館内の周囲環境画像をもとに対象物が再現した結果を図7に示す。複数のマルチバンド画像と3次元形状データから、コンピュータグラフィックスで表示するための前処理には約1時間要した。しかし、コンピュータグラフィックスのデータに変換後は、後で示すようにリアルタイムで表示することができた。一度、この時、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

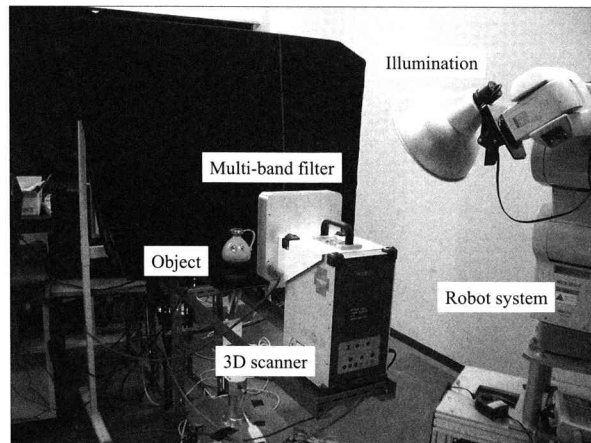


図6 自動撮影システム



図7 周囲環境の影響を考慮したレンダリング結果

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。

③……………質感工学のフレームワークと分光画像

2章のように得られたマルチバンド画像から物体各点の分光反射率を推定することができる。この分光画像は質感工学において大変重要な役割を果たす。一方、1章でも表したように色は物体の質感に対する一属性に過ぎない。光沢感、粒状感や透明感などの他の属性も実用的な異なる環境下間の質感の再現システムでは考慮する必要がある。これらの問題を解決すべき筆者らは質感の正確な記録、再現、合成を目指した質感工学に関する研究を行っている。

ここでは、まずこの質感工学（色や質感）の要素技術となる分光画像を用いた質感工学のフレー

ムワークを述べる。さらに、このフレームワークに基づき行った研究事例を説明する。さらに5章にて、博物館応用を目指した事例を述べる。

3.1 質感工学とコンピュータグラフィックス

図8に試作品の色と質感を評価する流れを非常に単純な図で示す。材料に手を加えることにより試作品が作られ、それをある照明下で人間が観察し、評価する状態を模式的に示している。評価結果がプロセスや材料にフィードバックされ、試作品の改善が行われる。しかし、この過程には多大な労力と時間を要し、開発サイクルのボトルネックとなっている。

図8に示すように、コンピュータグラフィックス (CG) 技術を用いることで、実際に材料から試作することなく、計算機内で加工し、表示デバイスに画像として商品の色や質感が表示することができる。この時、3D形状を作成し、表面の反射特性を付加する処理をCGではモデリング (Modeling) と呼ぶ。計算機内で構築された3D物体に、光線追跡などにより計算機内で照明をあて、仮想カメラで撮影する処理をレンダリング (Rendering) と呼ぶ。

これまで光線追跡などによるリアルなレンダリングには大変な時間を要した。そのため見る角度を変化させたり照明条件を変化させたりして観察することは困難であった。(リアルさに乏しいCGでは可能であった)。しかし、近年グラフィックボードに搭載されるグラフィック・プロセッシング・ユニット (GPU) の進化が目覚しく、ビデオレート程度の速さで、異方性や羽毛感などの様々な反射特性、さまざまな周囲照明環境下の画像を再現することが可能となった。これによりGPUに与える制御プログラミングが複雑になったが、2003年よりCg (C for Graphics) などGPU用の高級言語が開発され、一般にも大変利用しやすくなってきている。

これまでCGにおいては、R、G、Bの3色と透明性を決める α の4つの色属性のみで計算されてきた。しかし、周囲照明による色の変化や、物体間の相互反射などに計算では、抽象的な4つの色属性のみでは十分に再現できない。そこで、色の物理情報である分光情報を利用するSpectral Renderingの機運がCGの分野でも近年活発になりつつある [24-26]。プログラミング可能なグラ

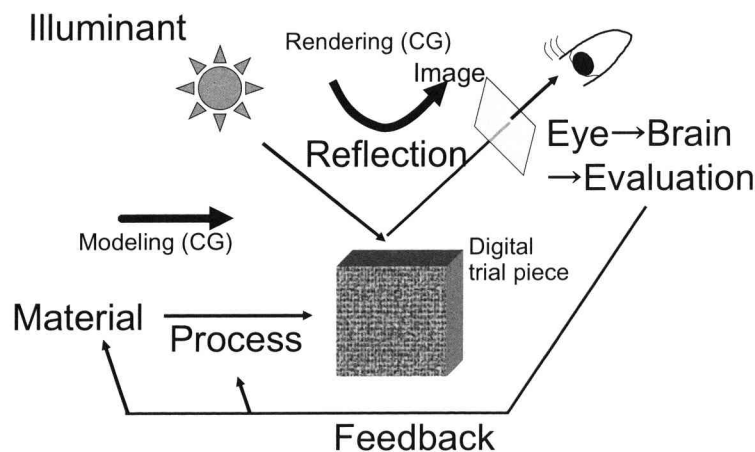


図8 質感工学とコンピュータグラフィックス

フィックハードウェアの進展にともない、Spectral Rendering をリアルタイムに実現することが可能になりつつある。この Spectral Rendering の発展にともない、コンピュータグラフィックスのパーツとして用いられる物体の BRDF やテクスチャの計測においても、分光画像に基づく計測が益々期待されている [27]。

3.2 質感工学とコンピュータビジョン

3.1 節で述べたように CG を用いたリアルな再現技術が近年急速に充実してきた。しかし、モデリングには多大な時間を要し、また実物の製作は可能であるがプロセスを計算機で書き出すことが不可能な場合も多々ある。たとえば、化粧品開発において顔画像のモデルは非常に重要であるが、実際の顔のようにリアルなものは容易に作成できない。また、個人にカスタマイズした忠実なモデリングなど不可能に等しい。そこで、撮影された画像または画像群から 3 次元形状や反射特性を推定する Image Based Modeling が、1990 年代後半から活発に研究され実用化されてきた。これに関しては、博物館応用としても既に 2 章で例を示しているように、画像から再構成されたモデルに異なる視点、異なる周囲照明下での画像をレンダリングすることで簡易にリアルな画像を合成することができる (Image Based Rendering)。これらは画像からシーンを解析するコンピュータビジョン (CV) の技術を応用したものである。

図 9 におけるインバースレンダリングは撮影された画像群から照明や視線の影響のない物体固有の反射特性や 3D 形状を復元する過程である。インバースモデリングは、さらにその反射特性や 3D 形状を生成する要素に分解する過程である。物体固有の反射特性や 3D 形状を復元することにより、様々な環境下での画像、反射特性を変化させたときの画像を予測することが可能である。さらにインバースモデリングにより材料特性まで分解することにより、その材料を変化させた場合の画像の予測が可能となる。CG 技術と CV 技術を対象に応じて使いこなすことで、簡易に様々な製作・観察条件下のリアルな画像を作成することができる。

インバースレンダリングとインバースモデリングにおいて、レンダリングとモデリングのプロセ

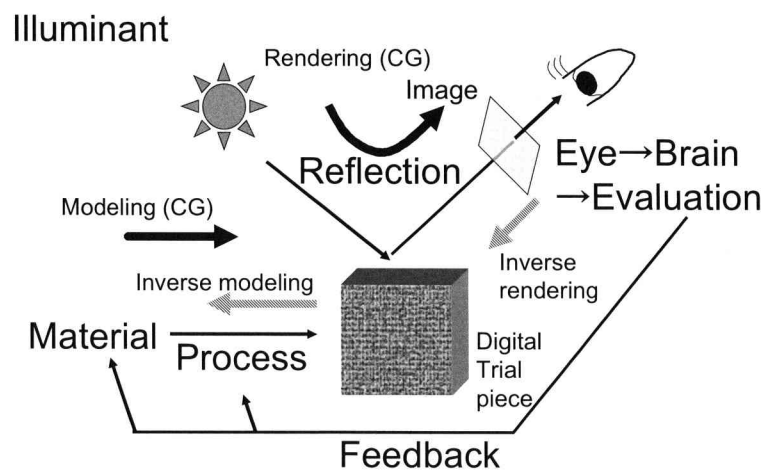


図9 質感工学とコンピュータビジョン

スを厳密に考慮する必要がある。厳密なプロセスは、物理に基づくプロセスであることは明らかである。分光画像に基づく手法は、物理に基づくプロセスのために重要な技術となる。

3.3 質感工学とネットワーク技術

前節までは、作成された画像はその場で観察することを想定して説明してきた。しかし、近年の開発プロセスにおいて、距離による時間短縮のためネットワークを介して遠隔で評価することが求められている。例えば、従来のハードコピーによるカラープルーフは、印刷の色再現を評価したり参照したりするために広く用いられてきたが、実物の移動コストや時間短縮を目的として、正確なデジタルカラープルーフの利用が印刷業界では大変期待されている。さらに、電子商取引や遠隔医療ではこれが必修の要求となる。この時、図10に示すように観察する環境により表示デバイスの特性や、周囲環境が異なる。したがって、これらを考慮した色と質感の再現技術が必要となる。

周囲環境光の変化による色の見えの変化に対しては、分光画像を用いた正確な色再現が必要となる。

表示デバイスの特性では、その特性に応じて感じる光沢感が異なるため、デバイスに依存しない光沢感の再現が必要である。有効な輝度のダイナミックレンジ圧縮も求められている。

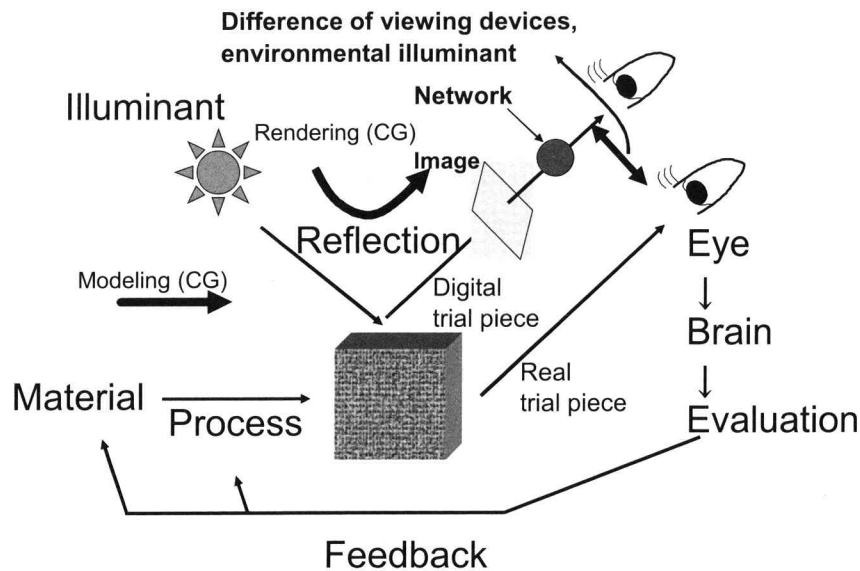


図10 質感再現とコンピュータネットワーク

④……………複合現実感を利用した応用事例

本章では、博物館応用を目的とし、投影型プロジェクタを用いた任意の環境、視線方向下での画像再現やインタラクティブな操作を行うため画像提示システムを構築した。構築する画像提示システムの処理の流れを図11に示す。投影型プロジェクタを用いる利点としては、デジタルアーカイ

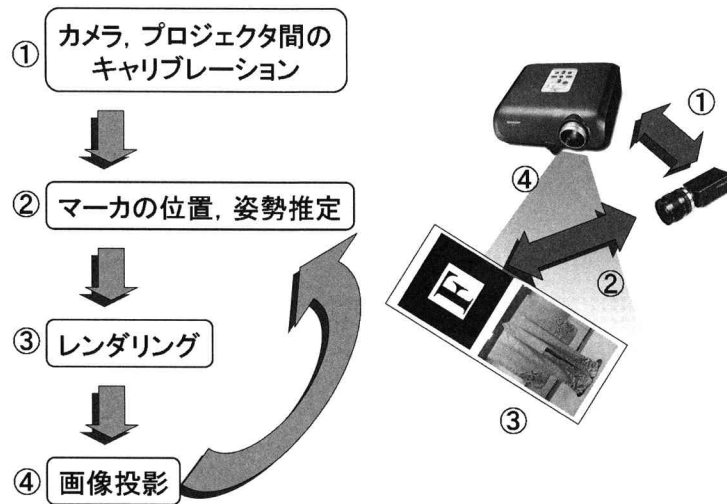


図 11 画像提示処理の流れ

ブを実空間内に直接投影可能なため、利用者はシームレスな画像提示を受けることが挙げられる。また画像の投影対象に紙を用いることで、特殊な機器を用いることなく画像を観察することが可能となる。質感情報の知覚に不可欠な視線方向の変化は、紙に2次元マーカを印刷しておき、ビデオカメラと複合現実技術を用いることでインタラクティブな操作が可能となる。

本節では、コンピュータグラフィックスにより作成されたヴァーチャルな画像を現実世界に投影することにより得られる先に述べた3つの質感工学のアプローチの融合領域を博物館に应用した初期実験に関して述べる。

4.1 投影型プロジェクタを用いた画像提示システムの概要

構築する画像提示システムは投影型プロジェクタ、ビデオカメラ、これらを制御する計算機、2次元マーカを印刷した紙から構成される。まずビデオカメラが紙に印刷された2次元マーカをフレーム画像として取得する。取得した画像から複合現実技術を用いてマーカの位置、姿勢を推定する。推定された情報から計算機によって投影するコンピュータグラフィック画像を生成する。この際カメラとプロジェクタのキャリブレーションを行っておく必要がある。生成する画像は偏角分光スキャナで取得したデータを用いることでよりリアルな画像再現が可能となる。その後利用者が紙を動かしたとしてもビデオカメラでマーカを認識している限り位置、姿勢を求めることが可能なため、インタラクティブな画像提示を行うことが可能となる。

図11に示す画像提示システムの処理のうち本節では、カメラ・プロジェクタ間のキャリブレーションに関して述べる。構築するシステムでは、カメラとプロジェクタの座標系が異なるため、画像を投影する前に両者のキャリブレーションが必要となる。キャリブレーションとはカメラ、プロジェクタの内部、外部パラメータを求めることであり、このパラメータを利用することで両者の位置関係が既知となる。本研究ではカメラ、プロジェクタのキャリブレーションに空間コード化法を用いる。まずカメラ座標系と物体座標系の関係を考える。カメラ座標系における画素の位置を (X_c, Y_c) と表す。こ

ここで物体座標系は 3 次元空間中の任意の場所に原点と座標軸を固定するものとする。このとき物体上の点 (X, Y, Z) とその点の画素位置 (X_C, Y_C) は式 (15) のように表現される。

$$\begin{pmatrix} H_C X_C \\ H_C Y_C \\ H_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

行列 C をカメラパラメータと呼ぶ。物体上の点、画像上の点は同次座標系で表している。式を展開し、媒介変数 H_C を消去すると次式のように表される。

$$\begin{aligned} (C_{11} - C_{31}X_C)X + (C_{12} - C_{32}X_C)Y + (C_{13} - C_{33}X_C)Z &= C_{34}X_C - C_{14} \\ (C_{21} - C_{31}Y_C)X + (C_{22} - C_{32}Y_C)Y + (C_{23} - C_{33}Y_C)Z &= C_{34}Y_C - C_{24} \end{aligned} \quad (16)$$

カメラパラメータを求めるためには、物体座標が既知である点についてその点のカメラ座標を求め、得られた物体座標とカメラ座標の組を既知の値とし、式に代入する。カメラパラメータは 12 個の未知数を含むので、8 組の既知の点を用いることで求めることが可能となる。実際には推定精度を向上させるため、8 組以上の点を与えて冗長性を付加し、最小二乗法を用いてカメラパラメータを決定する。

次にプロジェクタ座標系と物体座標系との関係を考える。プロジェクタ座標系は 2 次元座標である。投影するグレイコードパターンが縦縞であると考えると X 方向の 1 次元のみの識別となり、コード値 X_P を用いて $(X_P, 1)$ という同時座標で表現する。プロジェクタ座標系と物体座標系との関係は式のような行列 P で表現される。

$$\begin{pmatrix} H_P X_P \\ H_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

行列 P をプロジェクタパラメータと呼ぶ。この式を展開し、媒介変数を消去すると、次式のように表せる。

$$(P_{11} - P_{21}X_P)X + (P_{12} - P_{22}X_P)Y + (P_{13} - P_{23}X_P)Z = P_{24}X_P - P_{14} \quad (18)$$

プロジェクタパラメータを求めるためには、物体座標が既知な点についてその像のプロジェクタ座標を求める。得られた物体座標とプロジェクタ座標の組を既知の値とし、式に代入し、 P を未知数とした連立方程式を作成して解くことでプロジェクタパラメータが求まる。 P は 8 個の未知数を含むので、最低 8 個の方程式を作成する必要がある。これには、8 個の既知の点を使用すればよい。実際には精度を向上させるため、多数の点の座標を与えて冗長性を付加し、最小二乗法を用いて P を決定する。またこの処理を、グレイコードパターンを横縞にしたものを投影することで、Y 方向の関係も求めることが出来、プロジェクタパラメータを決定することが可能である。

4.2 ARToolKit を用いたマーカの位置、姿勢検出

インタラクティブな操作の実現のために、ビデオカメラで取得されるフレームごとに紙に印刷された 2 次元マーカの位置、姿勢の検出を行う。本研究ではマーカの位置、姿勢検出に ARToolKit

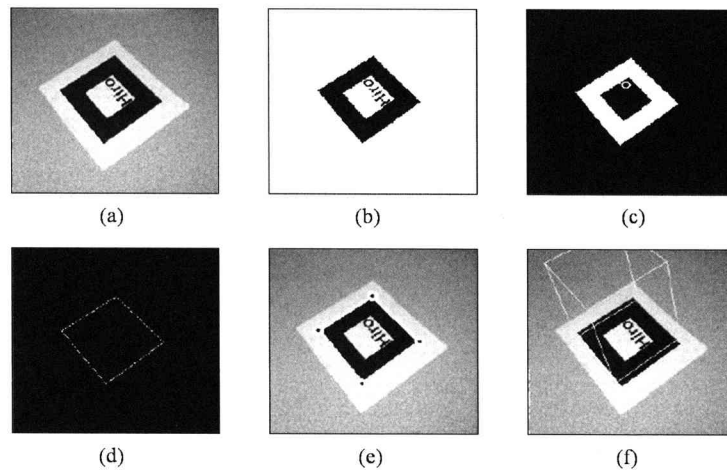


図12 ARToolkitを用いたマーカの位置・姿勢推定
(参考文献[27]より抜粋)

[27]を用いる。ARToolkitはAugmented Realityを用いたアプリケーションを簡易に構築するためのC、C++言語用のライブラリ群であり、ワシントン大学のHuman Interface Technology LaboratoryがSIGGRAPHで展示した“Shared Space”プロジェクトをベースに整備されたものである。フリーでダウンロードが可能である[27]。Augmented Reality技術を用いたアプリケーションで最も困難な処理は仮想物体を正確に実空間中に重ね合わせる部分である。ARToolkitではコンピュータビジョンの技術を用いることでカメラとマーカの相対的な位置、姿勢を推定することが可能となる。ここでARToolkitを用いたマーカの位置、姿勢推定原理の詳細について述べる。

- 1) 入力された画像(図12(a))を閾値処理により2値化画像に変換する。(図12(b))
- 2) またラベリング処理を行うことで連結領域ごとの面積と外接する長方形の計算を行う。各ラベルにおいて面積値の巨大領域と微小領域、外接する長方形が画像境界に接する連結領域を除外する。(図12(c))
- 3) 残った連結領域に対して輪郭線追跡を行い、輪郭線上の画素座標を求める。(図12(d))
- 4) 輪郭線上の画素座標に対して直線近似を行い、4本の線分を求める。これらの線分で囲まれた領域をマーカ位置の候補とし、4本の線分の交点の座標値を求める。(図12(e))
- 5) 線分で囲まれた領域内と利用者によって与えられた大きさと画像が既知のマーカとの間でテンプレートマッチングを行い、評価値の最も高いマーカを特定する。
- 6) 求めた4つの交点(マーカの四隅の頂点)座標を用いることでマーカ座標系からカメラ座標系への変換行列を推定する。変換行列からマーカに対応した仮想物体を重ね可能となる。(図12(f))

4.3 GPUを用いた画像レンダリング

前小節までで求めた情報を基に投影すべき画像を生成する。描画する画像の生成には2D、3Dグラフィックスアプリケーション開発のためのAPIであるOpenGLに加えC for graphicsを用いる。C for graphics (Cg)はnVIDIA社が開発したリアルタイムグラフィックス用のプログラミング言語であり、画像処理に特化したハードウェアであるGraphic Processing Unit (GPU)の動作を制御

することが可能となる。GPUは物体の頂点ごと、画像の画素ごとの処理を高速に行うことが出来、よりリアルなコンピュータグラフィックの生成を可能とする。CgによってGPUでのプログラミングを行い、OpenGLで画像を描画する。また本研究では物体表面の微小な凹凸を再現するため、バンプマッピングと呼ばれる手法を画像レンダリングに用いる。一般的に微小な表面形状を正確に記録するためには多数のポリゴンを使用しなければならず、記録、再現コストが高くなってしまう。バンプマッピングでは画素ごとの表面法線ベクトルを使用し、擬似的に陰影づけを行うことで、物体表面の微小な凹凸の正確な再現が可能となる。生成した画像は4.1節で求めたカメラ、プロジェクタの内部、外部パラメータを用いることで、実空間でのマーカ位置、姿勢に対応した画像をプロジェクタにより投影する。

4.4 画像提示実験

4.4.1 実験ジオメトリ

構築した画像提示システムのジオメトリについて述べる。図13に構築したシステムの外観を示す。ビデオカメラはLumenera社製USBカメラLuCamである。カメラのレンズにはFUJINON社製HF16HA-1を使用した。プロジェクタにはMitsubishi社製LVP-XD205を用いた。PCにはDELL社製WindowsPCを使用し、CPUにPentiumM 2.13GHz、GPUにnVIDIA GeForce Go 6800を搭載している。画像を投影する対象として厚紙に2次元マーカを印刷した紙を貼り付けたものを使用する。カメラ、プロジェクタ間のキャリブレーションには5.1節で述べた手法を使用する。物体座標が既知の物体として方眼紙から作成した図14に示す立方体を使用した。カメラ、プロジェクタパラメータを求めるために10パターンのグレイコードとコードを反転させたパターンの計20パターンを縦縞、横縞それぞれ投影し、画像を取得し、カメラ、プロジェクタの外部パラメータを推定した。グレイコード投影画像の例を図15に示す。

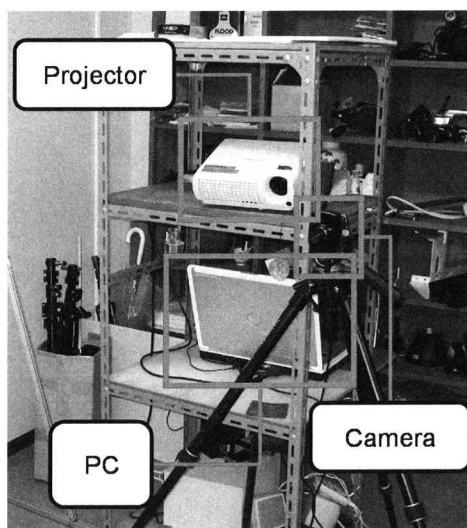


図13 実験ジオメトリ

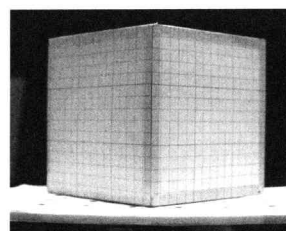


図14 キャリブレーションに用いた立方体

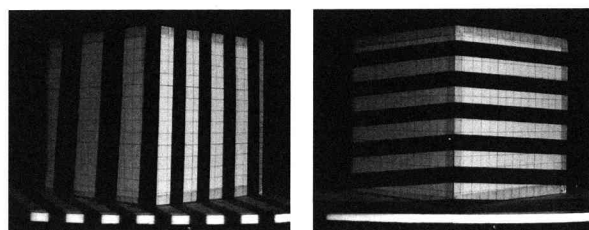


図15 グレイコード投影画像の例

4.4.2 実験結果

今回、提示する物体として金色紙にわずかな凹凸のある物体を用いた。投影する空間としては、博物館におけるパンフレットへの重畳投影や家庭における様々な物体への重畳投影を想定している。これにより、博物館で展示されていない資料に対しても博物館内や家庭において鑑賞することが可能となる。今回、コンピュータグラフィックス技術で用いられる画素単位でその画素の法線方向を与えるバンプマッピングと呼ばれる手法を用いることにより表面の凹凸を表現する。これにより、マーカのある紙面などを動かすことでリアルな光沢感を再現可能である。計算機内で生成された画像はプロジェクタを用いて実際の紙上に投影される。その際4.1節で述べたキャリブレーション手法によって得られた外部パラメータを用いることで、カメラとプロジェクタ間の相対的な位置関係を求める。この関係を利用することで、実際の紙上に生成した画像を適応的に投影することが可能である。図16の結果に示すように、投影される紙面を傾けても、マーカで示された位置をもとに所望の位置に正しく投影されていることを確認した。また、紙面の傾きに従って、光沢の見えの変化を自然に再現していることから、適応的にレンダリング出来ていることが確認できた。光沢の見えの変化は、画像提示は図17のような環境で行われる。図

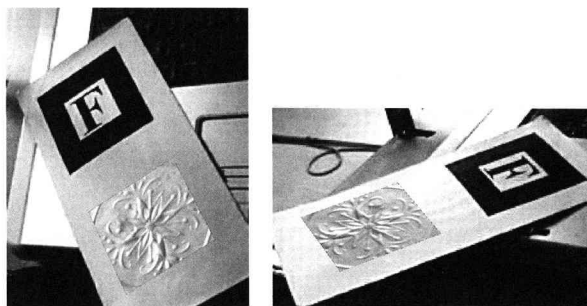


図16 画像生成結果

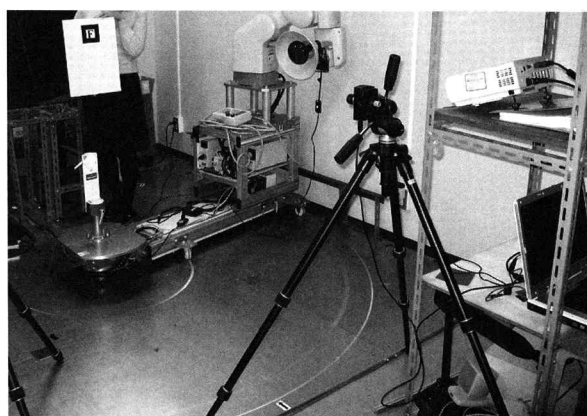


図17 画像提示実験環境

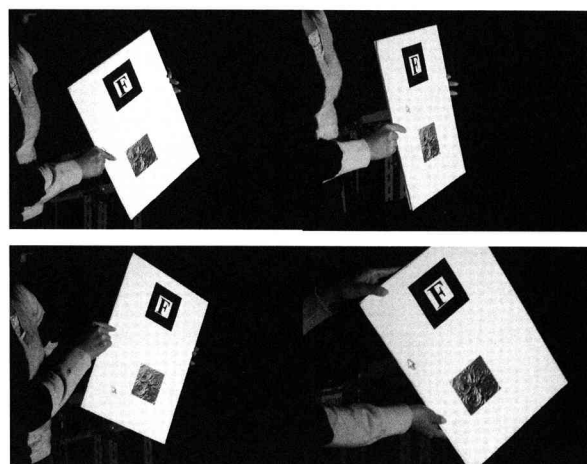


図18 画像提示実験結果

18に画像提示結果の例を追加で示す。今回は投影される紙を手で持って動かしているため、マーカの移動に応じて、リアルタイムに投影画像を生成することができているかに関して確認した。その結果からマーカの示す位置に応じて、画像を投影出来ていることが分かる。利用者が手に持った紙面などに投影することにより、資料をあたかも手でもって鑑賞する体験を提供することが可能になったと考える。

4.4.3 考察

構築した画像提示システムでは自然な画像提示を行うことが可能である。また描画速度は約20fpsであり十分インタラクティブな操作を行うことが出来る。画像を投影しているボードを自由に動かすという直感的な操作で、物体の様々な光沢感を知覚することが可能である。物体表面での光沢知覚のためには、微小な凹凸まで形状情報として持つことが必要であったが、バンプマッピングを用いることで、容易に物体表面の微小な凹凸を再現することが可能となった。プロジェクタを用いた画像投影では、現在一般的なプロジェクタでは輝度が低いため、周囲が明るい環境では正確な画像投影が行えない。しかしマーカの検出を行うためには、なるべくマーカが明るくなければカメラでマーカを認識出来ないという問題がある。そこで本研究では生成された画像のレンダリング以外の領域を白で描画することで、プロジェクタによる照明を行う。これにより周囲を暗くした環境下において、正確な画像投影を行うことが出来、プロジェクタによる照明でカメラがマーカを十分に認識することが可能となった。今回の実験で使用したビデオカメラは産業用のビデオカメラであるが、安価なビデオカメラを用いても、提案した画像提示システムを構築することは出来る。そのため画像提示の精度と構築するためのコストを考慮したシステムの構築も可能である。

問題点として、カメラが取得可能な範囲と、プロジェクタが投影可能な範囲が大きく異なる場合、正確に画像を投影出来ないことが挙げられる。画像を正確に提示するためには、カメラが取得可能な範囲にマーカがあり、かつプロジェクタが投影可能な範囲に投影対象があることが必要であるので、両者の範囲が大きく異なると、自由にマーカを動かすことが可能な範囲が狭くなってしまうためである。この問題点解決のためには、現在1台のカメラとプロジェクタで構成されているシステムを、複数のカメラ、プロジェクタを用いたシステムに改良することが考えられる。また現在のシステムでは利用者の視線方向は未知であり、任意に決定した視線方向を与え、表面反射成分を生成しているが、正確な光沢感再現のためには、利用者の視線方向の取得が必要である。複数のカメラを用いるシステムを構築することが出来れば、人間の顔トラッキング手法を用いることで目の位置を求めることが出来るため正確な光沢感再現が可能となる。光沢感の知覚には周囲の照明環境の影響を考慮する必要があるが、今回の実験では周囲の照明環境は考慮していない。そこで画像を提示する位置における周囲の照明環境を、ミラーボールなどを用いて取得し、環境マッピングを用いた光沢再現を行うことでよりリアルな画像提示を行うことが可能となる。以上の改善により、博物館応用において、よりリアルな資料の再現が可能になると期待される。

⑤……………おわりに

本論文では、質感工学（色や質感）における重要要素技術となる分光画像を用いた手法を述べた。さらに、分光画像と質感工学の係わり合いとともに質感工学のフレームワークを述べた。この質感工学のフレームワーク内である複合現実感（コンピュータグラフィックスと実世界の融合）を博物館における電子資料閲覧に適応した例として、紙面上に凹凸のある金紙を投影する実験を行った。この時、投影する紙面の傾きに依じて、幾何学的にリアルタイムに補正して投影しつつ、バンプマッピングにより光沢の見えも制御した。本研究の遂行にあたり大学院生である滝口君はじめ研究室内

外の多くの方々からご支援いただいた。特に、現在ニコンの宮田博士に多くのご指導をうけた。心より皆様のご援助を感謝している。

参考文献

- 1) 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).
- 2) 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.
- 3) 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) pp. 532-537.
- 4) 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.
- 5) 三宅洋一編, "分光画像入門", 東京大学出版会 (東京, 2005)
- 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-Dimensional 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) 伊庭育志, "遺伝的アルゴリズム", 医学出版 (東京, 2002).

-
- 24) Johnson GM and Fairchild MD, "Full-Spectral Color Calculations in Realistic Image Synthesis", IEEE Computer Graphics & Applications, 1999: 19: 47-53.
 - 25) Ward G, Elena EV, "Picture Perfect RGB Rendering Using Spectral Prefiltering and Sharp Color Primaries", Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering 2002.
 - 26) Franz Herbert, Oliver Unter Ecker, "Soft Proofing of Multi-Color Documents in a Panoramic Environment using Real Time Spectral Processing", The 13th Color Imaging Conference, (CIC13), p. 320, Scottsdale, USA, Nov, 2005.
 - 27) <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

(千葉大学大学院融合科学研究科, 国立歴史民俗博物館共同研究員)

(2013年3月25日受付, 2013年9月18日審査終了)

Appearance Reproduction and Its Applications to Digital Museum

TSUMURA Norimichi

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 paper, we will introduce the precise and efficient recording and reproduction methods.

Keywords: Digital archiving system, Color, Appearance, Recording, Reproduction

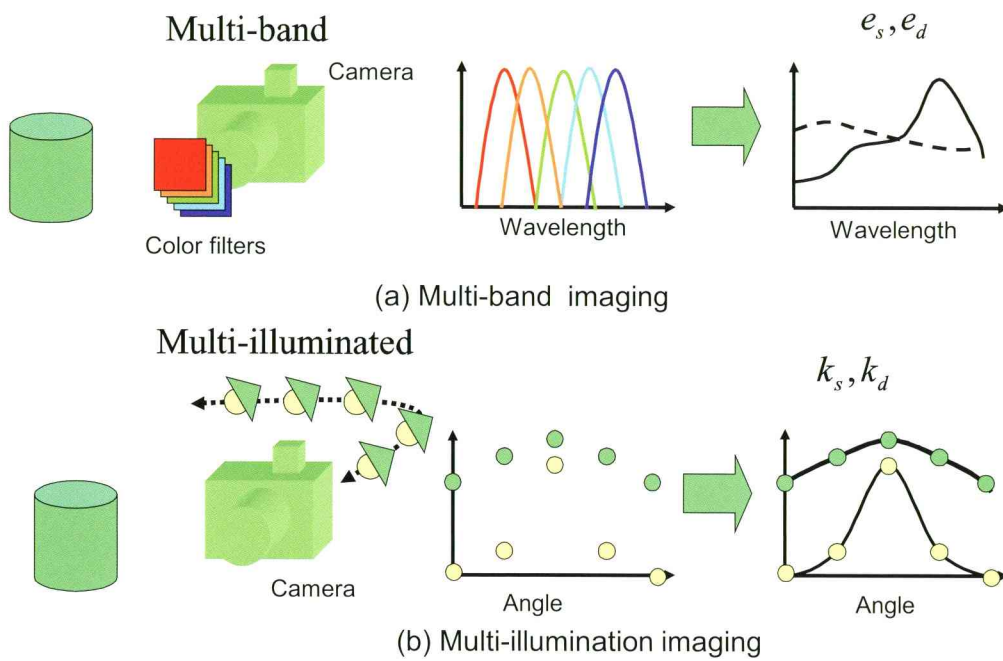


図1 偏角分光画像法 (a) マルチバンドイメージング, (b) 偏角イメージング

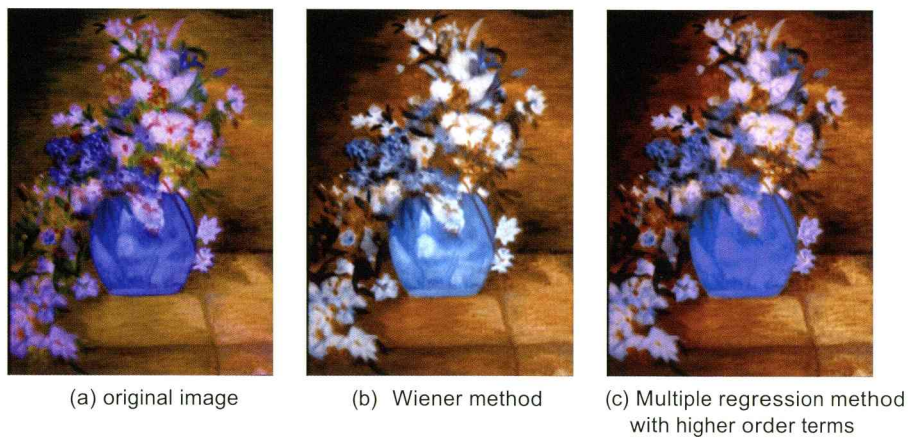


図3 マルチバンド画像を用いた油絵の具の推定結果の比較

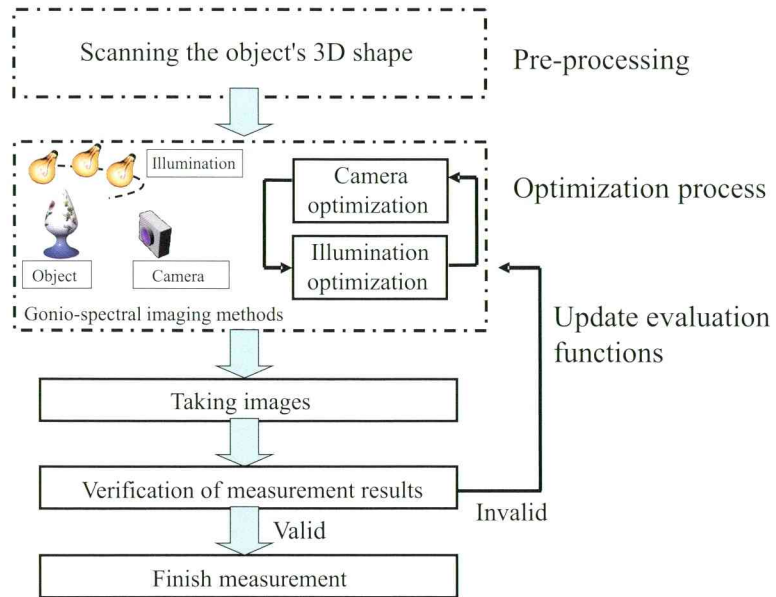


図5 照明位置・カメラ位置の最適化処理の流れ

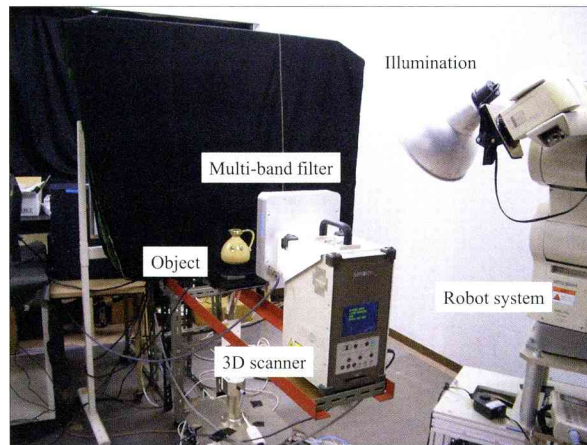


図6 自動撮影システム



図7 周囲環境の影響を考慮したレンダリング結果

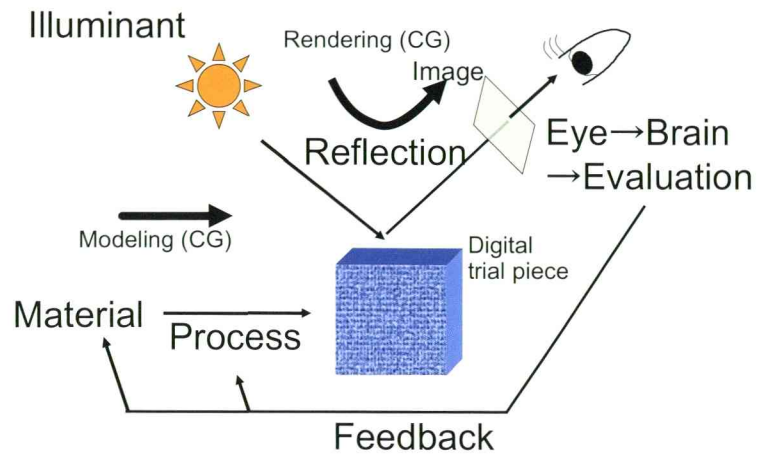


図8 質感工学とコンピュータグラフィックス

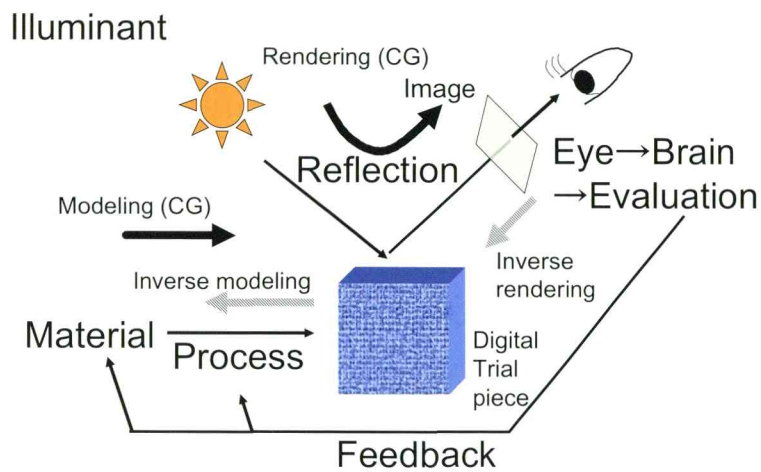


図9 質感工学とコンピュータビジョン

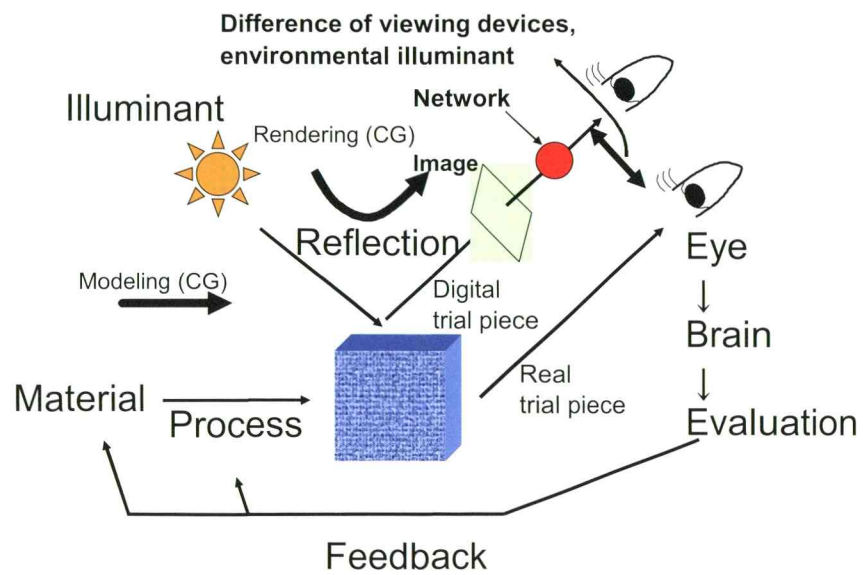


図10 質感再現とコンピュータネットワーク

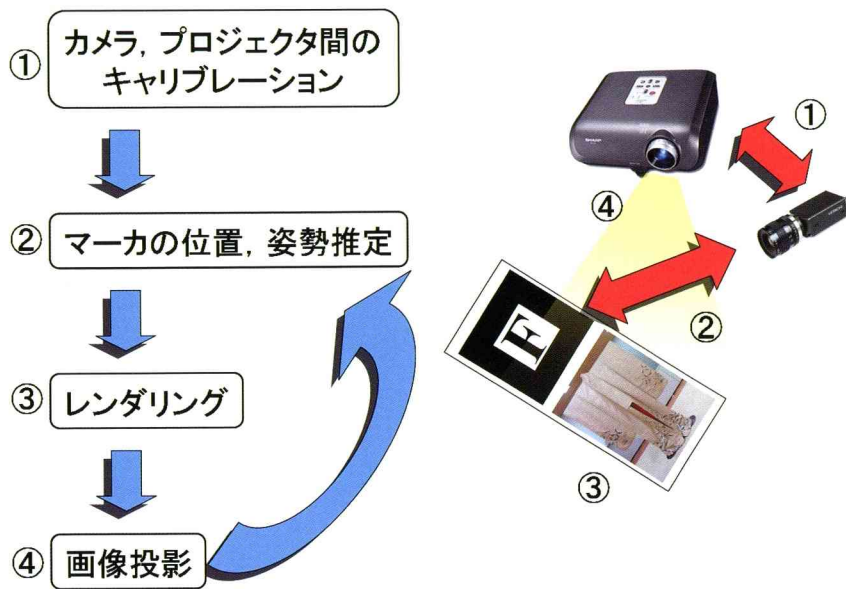


図 11 画像提示処理の流れ

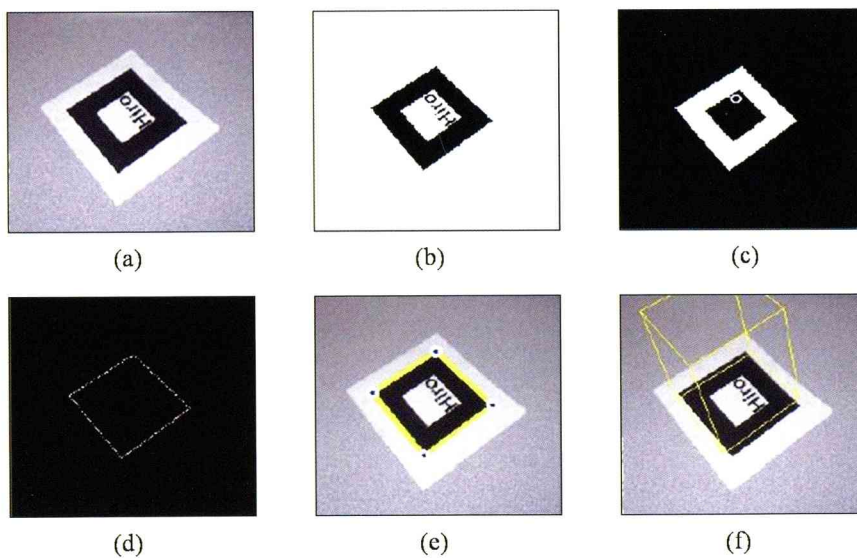


図 12 ARToolKit を用いたマーカの位置・姿勢推定
(参考文献[27]より抜粋)

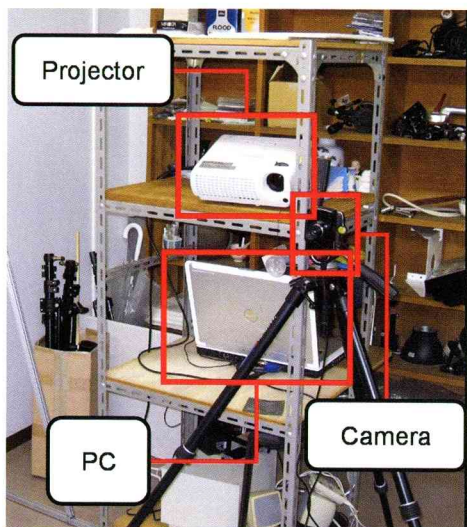


図13 実験ジオメトリ

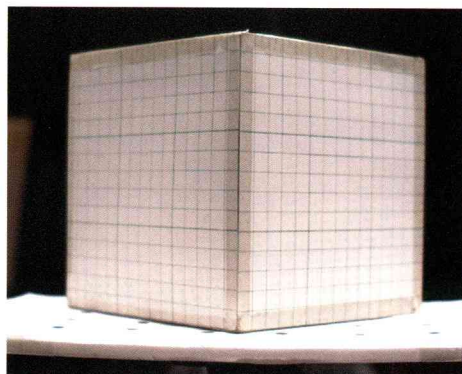


図14 キャリブレーションに用いた立方体

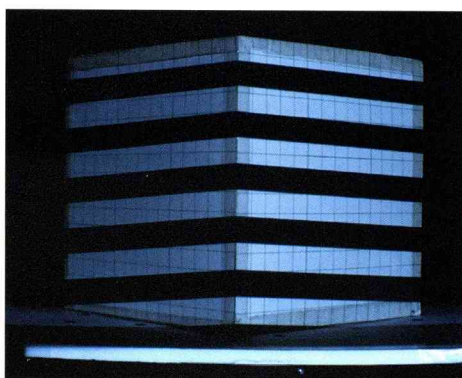


図15 グレイコード投影画像の例

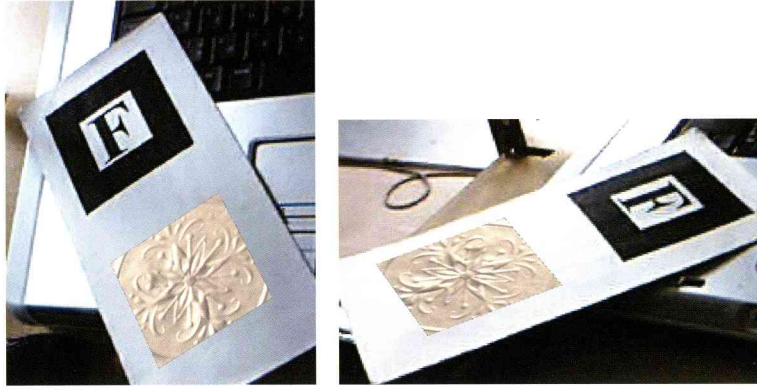


图16 图像生成结果

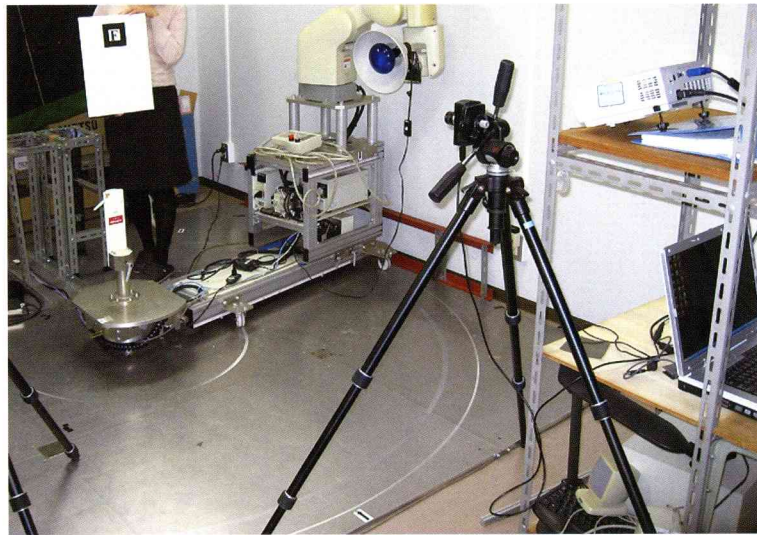


图17 图像提示实验环境

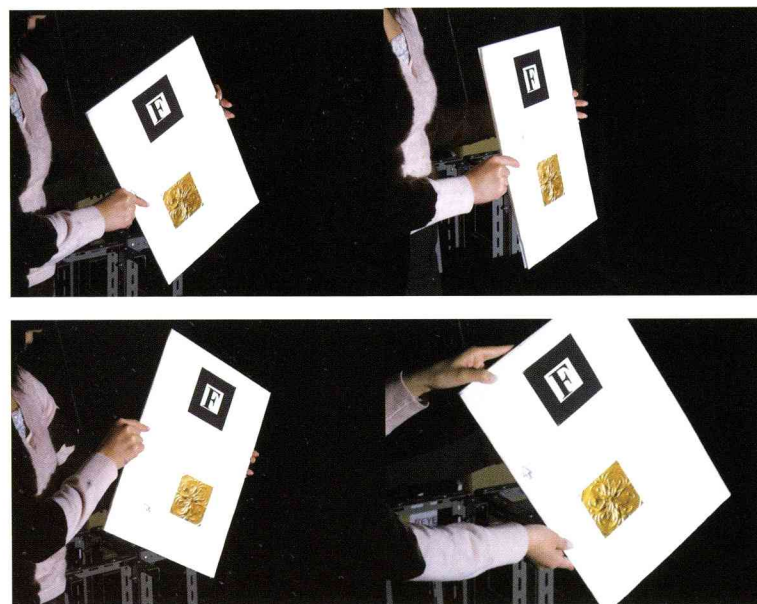


图18 图像提示实验结果