仮想光学環境における実物体反射特性の学習

向川 康博　　西山 正志　　尺長 健

岡山大学 工学部 情報工学科

〒 700-8530 岡山市津島中 3-1-1

mukaigaw@chino.it.okayama-u.ac.jp

あらまし

我々は，実世界のスクリーン物体へ光学パターンを投影することで，光源位置や反射特性を任意に変化させることができる仮想光学環境を提案している．本稿では，有形文化財の一例として陶器を扱い，実際の陶器の反射特性を学習し，仮想光学環境において再現する方法について述べる．まず，物体表面上の各点における反射特性は 2 次元関数で近似できることを示し，得られた関数が実際の陶器とスクリーン物体の形状の違いを考慮したテクスチャマッピングに利用可能であることを示す．次に，陶器表面のテクスチャの統計的な性質を再現するため，局所領域における反射特性関数の分布をマルコフモデルに基づいて学習する方法について述べる．最後に，実験結果より，陶器の持つ微妙な反射特性を，様々な形状のスクリーン物体上で再現できることを示す．

Learning of Photometric Properties from Real Objects for Virtual Photometric Environment

Yasuhiro MUKAIGAWA, Masashi NISHIYAMA, Takeshi SHAKUNAGA

Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama, 700-8530, JAPAN
mukaigaw@chino.it.okayama-u.ac.jp

Abstract

We have proposed a concept of Virtual Photometric Environment which is realized by projection of photometric patterns onto a screen object in the real world. In this paper, we discuss a learning method for reproducing photometric properties of ceramics, which is an example of cultural assets. The point reflectance is approximated by a 2D function, and the function can be used for texture mapping even if the shape is different between the real ceramics and the screen object. In order to reproduce statistical characteristics of the texture, distributions of the reflectance function in a local area are learned with a Markov model. Experimental results show that the appropriate photometric properties of ceramics can be reproduced on the screen object by the proposed method.

1　はじめに

実世界に存在する 3 次元物体に対して，仮想の陰影情報やテクスチャ情報を付加することができれば，照明設計や仮想美術館などの幅広い応用が期待できる．我々は，プロジェクタを用いることで，光源位置や物体表面上の反射特性を任意に変化させることができる仮想光学環境 [1] を提案し，試作システムを構築している．この環境は，実世界の幾何情報である白色スクリーン物体に対して，仮想世界の光学情報を表す光学パターンを，プロジェクタによって投影することで実現される．ユーザは，光学情報を付加された実世界を直接見ることができるため，単なる CG では得られない臨場感を得ることができ，有形文化財のデジタルコンテンツ化においてもいくつかの可能性を示している．そこで本研究では，一例として陶器を取り上げ，その表面反射特性を学習し，仮想光学環境においてスクリーン物体上で再現することで有形文化財の新しい展示方法を示す．また，これにより，実在する陶器の反射特性を単にコンテンツ化するだけではなく，その 2 次利用として，形状の異なる別の物体上でその陶器と同じ反射特性を再現することが可能であることを示す．このような技術は，文化財の比較研究の新しい可能性を示すと考えられる．

実物体から反射特性を学習する手法として，光源方向やカメラ方向などの撮影条件が既知である複数枚の入力画像から，反射モデルのパラメータを求める手法が提案されている [2, 3]．これらの手法では，少数のパラメータで反射特性を記述できるという利点がある．しかし，陶器などの複雑な反射特性を持つ物体を対象とした場合は，安定にパラメータを推定し，それを CG で忠実に再現することは容易ではない．一方，パラメータを求めることなく，大量に撮影した画像を利用することで反射特性を学習する手法も提案されている [4, 5]．撮影された画像集合によって反射特性を直接表現できるため，自然な画像を生成することできる．しかし，[4] は均一な反射特性で表される実物体のみ学習でき，[5] は実物体と同一形状であるスクリーン物体にしか適用できない．仮想光学環境では，均一でない反射特性を，形状の異なるスクリーン物体に適用する必要がある．

そこで，本稿では，物体表面上の各点における反射特性を形状に依存しない関数で表現し，局所領域における反射特性の分布を学習・再現する手法を提案する．まず，物体表面上の各点における反射特性が，2 次元関数として表現できることを示し，得られた関数が実際の陶器とスクリーン物体の形状の違いを考慮したテクスチャマッピングに利用可能であることを示す．また，陶器表面のテクスチャの統計的な性質を再現するために，局所領域における反射特性関数の分布をマルコフモデルに基づいて学習する方法について述べる．これにより，陶器の持つ微妙な反射特性を効率良く学習し，様々な形状のスクリーン物体上で再現することが可能となる．以下，2 節では，我々が提案している仮想光学環境について原理を概説し，構築した試作システムを紹介する．3 節では，実物体から反射特性を学習する方法について述べる．4 節では，実際に陶器から反射特性を学習し，それをスクリーン物体上で再現した実験結果を示す．

2　仮想光学環境

2.1　仮想光学環境の原理

仮想光学環境とは，実世界の幾何情報と仮想世界の光学情報を実世界で融合し，光源位置や反射特性の違いによる見え方の変化を，ユーザに提示できる環境である．図 1 のように，仮想光源によって実世界中の 3 次元物体 (以下スクリーン物体と呼ぶ) 上に生じるべき光学現象を，仮想光源とは異なる位置にあるプロジェクタから光学パターンを投影することにより実現する．これにより，仮想光源の位置や特性だけではなく，スクリーン物体の反射特性を仮想的に変化させることもできる．なお，本研究で扱うスクリーン物体は，すべての面をプロジェクタから照らすことができる白色の完全拡散反射面とし，プロジェクタ以外に実光源はないものとする．

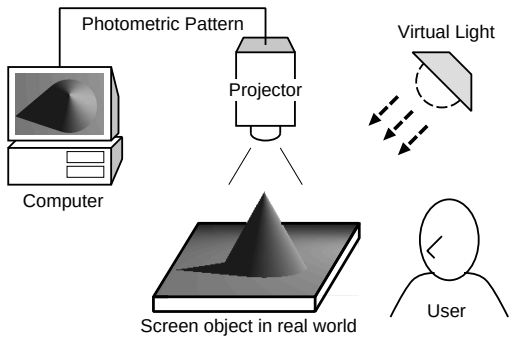


図 1: 仮想光学環境

2.2 光学パターン生成

光学パターンには，仮想光源によってスクリーン物体上に生じる拡散反射，鏡面反射，attached shadow，cast shadow などが含まれる．拡散反射・鏡面反射成分は，スクリーン物体の 3 次元形状，ユーザの視点位置，および，仮想光源位置から，以下に述べる反射モデルのパラメータを人間が直接指定することで算出することができる．

反射モデルとして，Torrance-Sparrow モデル [7] や Phong モデル [8] が挙げられる．簡単化した Torrance-Sparrow モデルにおいて，輝度 i は次式で示される.

$$i = k_d I_p \cos\theta_d + k_s I_p \frac{1}{\cos\theta_{s_1}} e^{\frac{-\theta_{s_2}}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

ここで，k_d は拡散反射率，I_p は入射光の強度，θ_d は法線方向と光源方向のなす角度，k_s は鏡面反射率，θ_{s_1} は法線方向と視点方向がなす角度，θ_{s_2} は光源方向と視点方向の 2 分方向と，法線方向とがなす角度，σ は微小面素の傾斜角度の標準偏差 (表面の粗さ) を表す.

一方，Phong モデルにおいて，輝度 i は次式で示される.

$$i = k_d I_p \cos\theta_d + k_s I_p \cos^n\theta_s \tag{2}$$

ここで，k_d は拡散反射率，I_p は入射光の強度，θ_d は法線方向と光源方向のなす角度，k_s は鏡面反射率，θ_s は光源の正反射方向と視点方向がなす角度，n は表面の粗さを表す.

attached shadow は $\cos\theta_d$ が負となるかを調べ， cast shadow は光源が他の物体に隠されているかを調べることにより決定される．attached shadow，および，cast shadow と判断された領域の輝度は 0 とする．

2.3 試作システム

仮想光学環境の原理を示すため，光学パターン投影用の液晶プロジェクタ 1 台，レンジファインダ用の 3CCD カメラ 1 台からなる試作システム [1] を構成した (図 2)．スクリーン物体の 3 次元形状は，カメラとプロジェクタを用いたレンジファインダ [6] により，あらかじめ獲得した．

図 3(a) の壷を含むスクリーン物体に対し光学パターンを投影することで，質感の違いを表現した結果を (b) と (c) に示す．仮想光源の位置は，それぞれ左方向，右方向に配置した．壷表面の反射特性を Phong モデルで表し，拡散反射率 k_d と鏡面反射率 k_s と表面の粗さ n を，手入力によって決定した．(c) では視点位置に合わせた鏡面反射が付加されており，(b) と比較してスクリーン物体の材質が仮想的に変化していることが分かる．このように，プロジェクタを用いてスクリーン物体に光学パターンを投影することで，仮想光源や物体の反射特性を任意に変えられることを確認した．

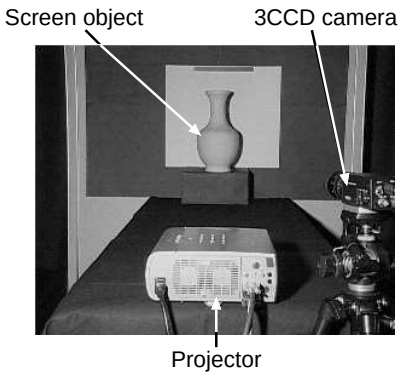


図 2: システム構成

(a) (b) (c)

図 3: 壷への光学パターン投影結果

3 実物体からの反射特性の学習

3.1 点反射特性と局所分布

2 節で述べた試作システムでは，光学パターンに与える反射特性を手入力によって与えているため，現実感の乏しい見え方となっていた．写実的な光学パターンの生成は，現実感を向上させる上で重要な課題の一つである．そこで，本研究では，実物体から反射特性を学習し，スクリーン物体上で再現することを目的とする．これにより，ユーザは仮想光学環境において，実在するスクリーン物体の幾何情報と，実在する物体の光学情報を重ねて見ることができ，高い現実感を得ることが可能となる．

反射特性を学習するために，光源方向を変えながら実物体を撮影した画像集合を用いる．撮影した画像集合は，その物体固有の反射特性を含むが，このままでは形状の異なるスクリーン物体へ反射特性を適用することはできない．これは，実物体表面上の各点で観測される輝度が法線方向に依存するためであり，法線方向に依存しない形で学習する必要がある．以下，実物体表面の各点の反射特性を点反射特性と呼ぶ．

実物体の点反射特性を学習することで，物体形状の違いを考慮したテクスチャマッピングが可能となるが，それだけでは実物体の点反射特性の分布と全く同じ見え方しか再現できない．種々の点反射特性で構成されるテクスチャの統計的性質をスクリーン物体上で再現するためには，点反射特性の学習だけでは不十分である．実物体表面の局所領域内で，点反射特性がどのように分布しているかについても学習が必要である．以下，これを局所分布の学習と呼ぶ．

なお，人間が意図的に付加した焼物の絵柄などを再現するためには，局所分布の学習に加えて，実物体全体に渡る大域分布の学習が必要となる．本稿では，大域分布は取り扱わず，局所分布の学習と再現に絞って報告し，大域分布は今後の課題とする．

以上より，仮想光学環境において実物体の反射特性を再現するためには，点反射特性とその局所分布の学習が重要である．これにより，様々な形状を持つスクリーン物体に対して実物体の反射特性を適用できる．

3.2 点反射特性の学習

3.2.1 双方向反射率分布関数

物体表面の法線方向に関して正規化された点反射特性を表すモデルとして，双方向反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function:BRDF) がある．BRDF は，光源方向 (θ_l, ϕ_l) からの入射光照度と，視点方向 (θ_v, ϕ_v) への反射光輝度の比率を表す 4 次元の関数 $f(\theta_l, \phi_l, \theta_v, \phi_v)$ である．(θ_l, ϕ_l)，および，(θ_v, ϕ_v) は法線方向に対して相対的な角度である．光源照度 L が一定な白色点光源から照らされている場合，反射光輝度とカメラによって観測される輝度が等しいと仮定すれば，観測される輝度 i は以下の式で表

される．

$$i = f(\theta_l, \phi_l, \theta_v, \phi_v)L \tag{3}$$

実物体表面上の各点における BRDF を獲得し，点反射特性の学習を行なうことができれば，容易に光学パターンに与える輝度を決定できる．スクリーン物体の法線方向に対して相対的なユーザの視点方向，仮想光源方向，および，仮想光源照度を，式 (3) に入力することで輝度は得られる．これにより，実物体とスクリーン物体の形状が異なる場合でも，テクスチャマッピングが可能となり，点反射特性を再現することができる．

3.2.2 反射特性関数の次元数

実際に，点反射特性を 4 次元の BRDF として獲得する場合，視点方向と光源方向の両方を変化させて撮影する必要があるため装置が複雑となる．また，物体表面上の各点ごとに 4 次元のデータを保持する必要があるため，データ量が膨大となる．しかし，実在する多くの物体において，点反射特性を獲得する際に 4 次元の観測データは冗長であると考えられる．そこで，4 次元から次元数を減らした場合の反射特性関数の表現能力について考察する．

実物体表面で観測される輝度は，拡散反射と鏡面反射の二つの成分の和で表されると考えることができる．これを表すモデルとして，2.2 節で述べた，Torrance-Sparrow モデル [7] や Phong モデル [8] が挙げられる．Torrance-Sparrow モデルでは，物体固有のパラメータ k_d, k_s, σ を一定とすると，拡散反射成分は θ_d に，鏡面反射成分は $(\theta_{s_1}, \theta_{s_2})$ にのみ依存する．従って，観測される輝度は合計 3 パラメータで記述でき，点反射特性は 3 次元反射特性関数 $f_t(\theta_d, \theta_{s_1}, \theta_{s_2})$ で表現することができる．即ち，観測される輝度 i は以下のように表される．

$$i = f_t(\theta_d, \theta_{s_1}, \theta_{s_2})L \tag{4}$$

同様に，Phong モデルでは，物体固有のパラメータ k_d, k_s, n を一定とすると，拡散反射成分は θ_d に，鏡面反射成分は θ_s にのみ依存する．従って，観測される輝度は 2 パラメータで記述でき，点反射特性は 2 次元反射特性関数 $f_p(\theta_d, \theta_s)$ で表現することができる．即ち，観測される輝度 i は以下のように表される．

$$i = f_p(\theta_d, \theta_s)L \tag{5}$$

さらに，拡散反射成分は 1 パラメータ θ_d で記述できるので，1 次元反射特性関数 $f_l(\theta_d)$ で表現することができる．従って，拡散反射物体のみを対象とする場合，観測される輝度 i は以下のように表される．

$$i = f_l(\theta_d)L \tag{6}$$

以上で述べた 2 次元，3 次元反射特性関数は，拡散反射と鏡面反射だけでなく，Phong モデルや Torrance-Sparrow モデルで完全に表現することのできない複雑な現象も，ある程度の精度で表すことができるため，表現能力が優れている．

3.2.3 2 次元反射特性関数のサンプリング

点反射特性を学習する際には，保持するデータ量が少なく，かつ表現能力が優れている必要がある．本研究では，点反射特性を表す関数の表現能力とデータ量のトレードオフの関係を考慮し，2 パラメータ (θ_d, θ_s) で決定される式 (5) の関数で学習する．すなわち，点反射特性は，2 次元反射特性関数として表現される．

2 次元反射特性関数を獲得するためには，観測点を中心とした円周上に，光源とカメラを移動させて撮影すればよい．しかし，カメラ位置を変化させて撮影する場合，画像間で観測点の対応づけが必要となるため安定に 2 次元反射特性関数を獲得することは難しい．そこで，カメラと実物体を固定した状態で，観測点

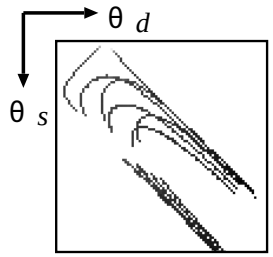


図 4: 2 次元反射特性マップ

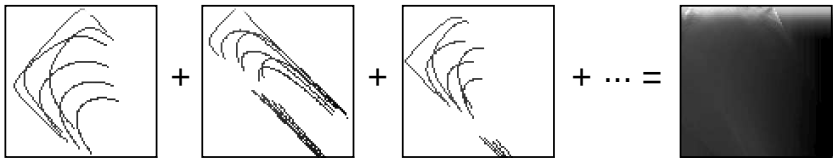


図 5: 2 次元反射特性マップの統合

に対する光源方向のみを変化させ撮影することで 2 次元反射特性関数を獲得する．なお，光源方向，視点方向，法線方向は既知とする．

しかし，光源方向をあらゆる方向に密に変化させ撮影すると装置が複雑になるため，実際には光源方向を離散的にサンプリングする必要がある．図 4 に，観測輝度をプロットした 2 次元反射特性マップの例を示す．2 次元反射特性マップとは，2 次元反射特性関数を画像として可視化したものであり，θ_d, θ_s は 2 次元反射特性関数の各パラメータである．この例では，光源方向を高さ 6 段階，水平方向に 1° 刻みで 200° 変化させ撮影を行なった．図 4 において，白色の領域は輝度が未観測であることを示しており，サンプリング間隔が粗い場合には，大部分が未観測となってしまうことがわかる．

3.2.4 クラスタ化による 2 次元反射特性関数の補完

2 次元反射特性マップにおいて，輝度が未観測の角度については，何らかの方法で輝度を推定する必要がある．各点における 2 次元反射特性関数を完全に独立に取り扱う場合には，観測輝度のみを手がかりにして未観測輝度を推定する必要がある．本稿では，各 2 次元反射特性関数ごとに独立して未観測輝度を推定する方法については本格的に取り扱わないが，観測輝度の単純な内挿・外挿でも，実用上は大きな問題とはならないと考えられる．

一方，実物体表面上に，点反射特性が同一である点が複数存在すると仮定すれば，2 次元反射特性関数をクラスタ化し，相補的に補完することが可能となる．この場合，クラスタ化が適切であれば，実際に観測された輝度で補完することができるため，単純な内挿・外挿と比較して，より正確な 2 次元反射特性関数を獲得することが可能となる．

2 次元反射特性関数をクラスタ化するためには，あらかじめクラスタ数を決定しておき，獲得した 2 次元反射特性マップの集合から各クラスタの代表を選択する．本稿では，これを代表 2 次元反射特性マップと呼び，目視により決定する．クラスタの分類を行なう点の 2 次元反射特性マップと，各クラスタの代表 2 次元反射特性マップでは，双方で輝度が観測される角度が存在する．この一致する角度における輝度の差を比較し，輝度差が最小となる代表 2 次元反射特性マップのクラスタを，その点が属するクラスタとする．

物体表面上の各点における 2 次元反射特性関数は，いずれかのクラスタに分類される．そこで，図 5 に示すように，各クラスタ毎に 2 次元反射特性マップを統合することで未観測輝度を補完する．マップの各

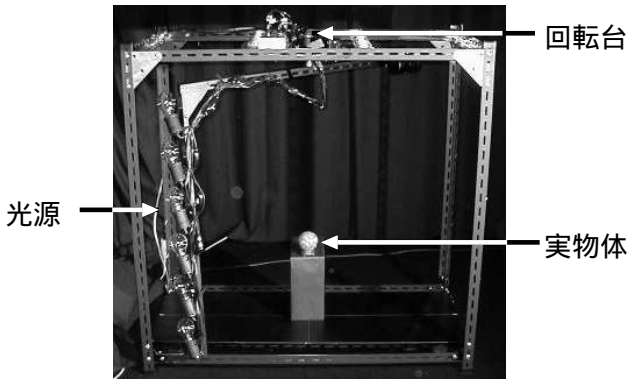


図 6: 全方向照明撮影システム

角度毎に，観測輝度の平均を算出することで統合は実現される．なお，この統合の後にも，輝度が未観測となる角度が残る場合があるが，この輝度は単純な内挿・外挿で推定するのが妥当と考えられる．

3.3 局所分布の学習

獲得した点反射特性を用いて，局所領域内での点反射特性の局所分布を学習する．実物体の点反射特性は，独立に出現するのではなく，周期性や指向性などが存在し，周辺の点反射特性と密接な関係をもつことが多い．周辺より点反射特性が決定される関係は，遷移確率で表現することができる．そこで，隣接する点の状態より注目する点の状態を決定するマルコフモデルに基づいて局所分布の学習を行なう．マルコフモデルを適用するためには，事前に状態の量子化が必要である．状態は 3.2.4 節で述べたクラスタであり，量子化はクラスタ化の結果を直接適用できる．

クラスタ数を c として，n 重マルコフ情報源で学習する場合，実物体表面上を走査することで，クラスタの全組合せである $c^{(n+1)}$ 通りの遷移確率を求める．n 重マルコフ情報源において，周辺のどの n 点を参照して遷移確率を求めるかによって，学習能力が大きく変化する．本稿では，テクスチャの統計的性質を効率良く学習するために，テクスチャの周期性や指向性を目視によって判断し，参照する点の配置を経験的に定めている．

また，局所分布を学習する際のクラスタ数 c は，クラスタ数が増加すると量子化誤差は減少するが，学習する領域が狭ければ十分に学習を行なえないという関係を考慮して決定する必要がある．一方，n 重マルコフ情報源は，n が増加するにつれ複雑な分布の学習を行なえるが，先ほどと同様に十分な学習を行なえないという関係を考慮して決定する必要がある．

4 実験結果

4.1 実物体の撮影環境

光源方向を変化させて実物体を撮影するために，図 6 に示す全方向照明撮影システムを構成した．このシステムは，実物体の撮影用，およびレンジファインダ用にカメラ 1 台，レンジファインダ用のプロジェクタ 1 台，照明用の光源 6 個で構成される．光源位置の高さは 6 段階とし，水平方向には回転台により自由に角度を制御できる．また，光源は実物体と十分に離れているため平行光源と仮定する．光源方向は，光源位置と実物体の重心位置を実測することで求めた．各光源の照度，距離などが一定でないため，法線方向が既知である白色の石膏を用いて光源のキャリブレーションを行ない，物体重心を中心点とした球面上に各光

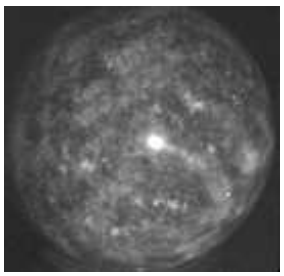


図 7: 大理石 (実物体)

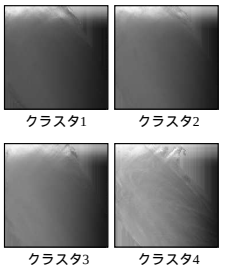
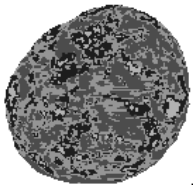
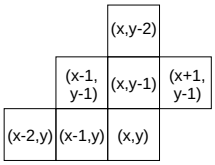


図 8: 学習した 2 次元反射特性マップ

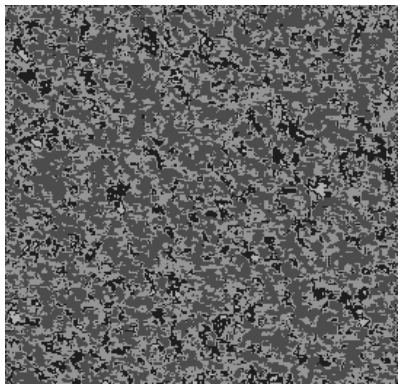
図 9: 点反射特性のクラスタ化



(a) クラスタ分布



(b) 参照点の配置



(c) 生成したクラスタ分布

図 10: 大理石の局所分布の学習結果

源が存在するように，各画像の画素値を正規化した．

カメラと実物体を固定した状態で，6(高さ)×201 (水平方向)= 1206 枚のカラー画像を，他の光源の影響を受けない暗室で撮影した．カメラの視点方向は実測により求めた．撮影する際に用いたカメラの焦点距離は十分に長いため正射影と仮定する．なお，撮影された画像集合のうち，114 枚は光源を取り付けたフレームによる隠れが発生したので除外した．

4.2 実物体からの反射特性の学習

本稿で提案した，実物体からの反射特性学習法の有効性を確認するために，反射特性が均一でない図 7 の大理石を用いて実験を行なった．この大理石の表面は大きく分けて 4 種類の点反射特性で構成されていると見なせるため，クラスタ数 c を 4 とした．各点における 2 次元反射特性マップをクラスタ化し，4 種類の 2 次元反射特性マップに統合した結果を図 8 に示す．マップの上部に出現する鏡面反射成分が安定に求まっていないが，これは視点方向の測定誤差によるものと考えられる．また，テクスチャの分布は変えずに，4 種類に量子化された 2 次元反射特性関数によって大理石を再現したものを図 9 に示す．黒色の部分は法線が正しく推定できなかった領域である．鏡面反射の見え方が異なることや，量子化の影響で全体的に微妙な点反射特性の変化がなくなっていることが分かる．しかし，入力画像の反射特性の性質は十分に再現できていることから，2 次元反射特性関数は十分な表現能力を持っているといえる．

次に，得られた点反射特性の局所分布の学習を行なった．マルコフモデルに基づいて局所分布を学習・再現した結果を図 10 に示す．(a) は実物体のクラスタ分布であり，各クラスタを 4 色の濃淡値で表現している．クラスタ 1 が大きく支配しており，クラスタ 1 の周辺にはクラスタ 2 が出現している．さらに，これらのクラスタの間にクラスタ 3 とクラスタ 4 が出現している．このように，テクスチャは等方向に周期的

(a) 壷　　(b) 弥勒菩薩

図 11: スクリーン物体 (白色石膏)

に分布していると判断できるため，(b) のように周辺の参照点を配置した 6 重マルコフ情報源により遷移確率の学習を行なった．この遷移確率に基づいて生成したクラスタ分布が (c) であり，先程述べた大理石の局所分布の特徴を十分に表しているといえる．以上のことから，マルコフモデルを利用することで，テクスチャの統計的性質を十分に学習できることを確認した．

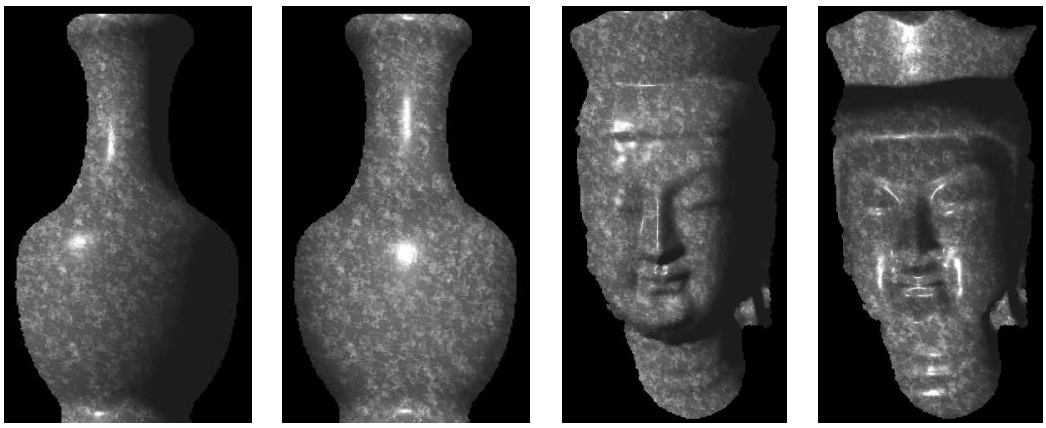
4.3　スクリーン物体上での反射特性の再現

実物体から学習した反射特性を，スクリーン物体上で再現するために，光学パターンを生成する実験を行なった．光学パターンを投影する白色石膏のスクリーン物体として，図 11(a) の壷と (b) の弥勒菩薩を用いた．スクリーン物体の形状はレンジファインダを用いて獲得した．

まず，前節で用いた大理石から学習した反射特性を，スクリーン物体上で再現した．壷と弥勒菩薩に対して光学パターンを生成した結果を，それぞれ図 12(a),(b) に示す．ユーザの視点位置はプロジェクタ付近とし，仮想点光源の位置を変化させ生成した．生成した光学パターンでは，スクリーン物体の形状に合わせて大理石の反射特性が適切に付加されていることがわかる．

さらに，有形文化財のコンテンツ化の一環として，陶器の反射特性を学習する実験を行なった．陶器として，中世六古窯の一つである備前焼を題材とした．備前焼は釉 (うわぐすり) を一切用いずに，窯の中で高温で焚き続けられる間に，独特の風合いを生じることが大きな特徴である．この実験では，図 13 (a),(b) に示すような，備前焼の代表的な窯変である緋襷，胡麻の反射特性を学習した．いずれの窯変も，陶器全体に渡る大域的なテクスチャに意味があることから，点反射特性のみを学習し，マルコフモデルによる局所分布の学習は行なわず実物体と同一の分布とした．それぞれの窯変の反射特性を学習し，スクリーン物体上で再現した結果を，それぞれ図 13(c),(d) に示す．2 次元反射特性関数はクラスタ化せず，各点ごとに独立して内挿・外挿する必要があるため，特に鏡面反射が正確に再現できていないが，各点における反射特性とテクスチャの全体的な性質は十分に再現できていることがわかる．

また，図 14(a) に示す陶器では，点反射特性だけでなく，局所的な反射特性の分布に意味があると考えられるため，局所分布をマルコフモデルにより学習した．局所分布を，クラスタ数を 4 とし，6 重マルコフ情報源で学習した結果を図 15 に示す．この陶器では，(a) に示すようにクラスタ分布に指向性はなく，細かい繰り返しが生じているため，(b) のように周辺の参照点を配置した．学習結果に基づいてクラスタ分布を生成した結果を (c) に示す．また，この反射特性をスクリーン物体上で再現した結果を図 14(b) に示す．この陶器の持つテクスチャの周期性を反映できていることが分かる．



(a) 壷に対する大理石の反射特性　　(b) 弥勒菩薩に対する大理石の反射特性

図 12: 大理石の光学パターン生成結果

(a) 緋襷 (実画像)　(b) 胡麻 (実画像)　(c) 緋襷の再現　(d) 胡麻の再現

図 13: 備前焼の反射特性の学習と再現

5　まとめ

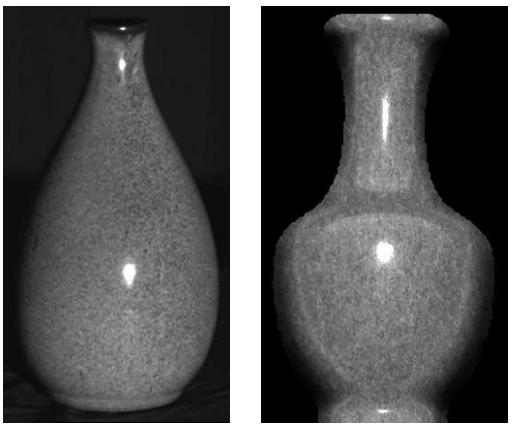
本稿では，仮想光学環境において，自然界に存在する実物体の反射特性を再現するための学習法を提案した．物体表面上の各点における反射特性を 2 次元関数によって表現し，その局所分布をマルコフモデルで学習することで，様々な形状をもつスクリーン物体上で，実物体の反射特性を再現できることを実験によって確認した．

今後の課題として，点反射特性のクラスタ数や，マルコフモデルを適用する際の周辺の参照点の配置などを，テクスチャの性質から自動的に決定することが挙げられる．また，人間が意図的に付加した絵柄などに対応するための実物体全体からの大域学習なども必要であると考えられる．

本研究は，科学技術振興事業団 CREST 池内プロジェクトの援助を受けて行なった．

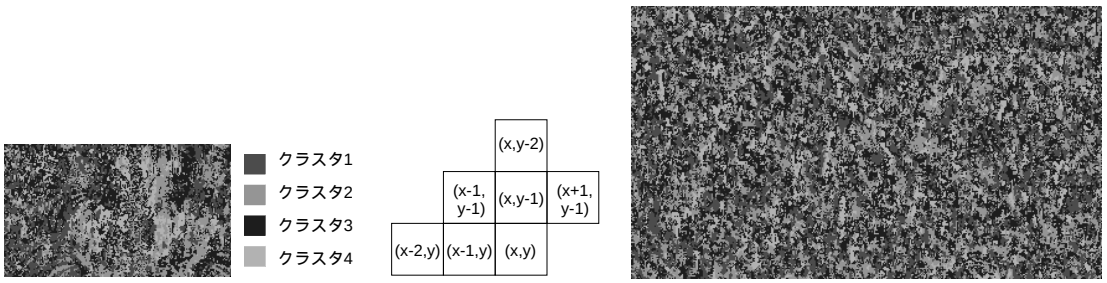
参考文献

[1] 向川康博, 西山正志, 尺長健, “スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現”, 信学論 D-II Vol. J84-D-II, No.7, pp.1448-1455, July 2001.



(a) 陶器 (実画像)　　(b) 反射特性の再現

図 14: 陶器の反射特性の学習と再現



(a) クラスタ分布　　(b) 参照点の配置　　(c) 生成したクラスタ分布

図 15: 陶器の局所分布の学習結果

[2] Y.Sato, M.D.Wheeler, and K.Ikeuchi, “Object Shape and Reflectance Modeling from Observation”, Proc. SIGGRAPH’97, pp.379-387, 1997.

[3] 町田貴史, 竹村治雄, 横矢直和, “複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定”, 信学論 D-II Vol. J84-D-II, No.8, pp.1873-1881, August 2001.

[4] S.R.Marschner, S.H.Westin, E.P.F.Lafortune, K.E.Torrance, and D.P.Greenberg, “Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin”, Proc. 10th Eurographics Workshop on Rendering, pp.139-152, June 1999.

[5] P.Debevec, T.Hawkins, C.Tchou, H.P.Duiker, W.Sarokin, and M.Sagar, “Acquiring the Reflectance Field of a Human Face”, Proc. SIGGRAPH2000, pp.145-156, 2000.

[6] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.

[7] K.E.Torrance, and E.M.Sparrow, “Theory for off-specular reflection from roughened surface”, J. Opt. Soc. Am, vol.57, pp.1105-1114,1967.

[8] B.T.Phong, “Illumination for Computer Generated Pictures”, Commun. ACM, vol.18, pp.311-317, June 1975.