陶器の反射特性学習と仮想光学環境への応用

○ 有光 博志　　向川 康博　　尺長 健
岡山大学工学部情報工学科

Acquisition of Photometric Properties from Ceramic Arts and its Application to Virtual Photometric Environment

○ Hiroshi ARIMITSU　　Yasuhiro MUKAIGAWA　　Takeshi SHAKUNAGA
Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University

Abstract:
In this paper, we discuss a method for acquiring photometric properties of ceramic arts. The point reflectance on the surface is represented by the bidirectional reflectance distribution function. Although the function defined in 4d space, we approximate it by a function defined in 2d space. Experimental results show that appropriate photometric properties of ceramics can be reproduced in the Virtual Photometric Environment[1].

1　はじめに

我々は，失われゆく有形文化財を，コンピュータビジョン技術によってデジタルコンテンツ化することを目指して研究を進めている．コンテンツ化の対象となる情報として，3 次元形状の他，表面の反射特性が重要と考えられる．本稿では，陶器を対象として，反射特性を効率良く学習する方法について述べる．学習した反射特性は再現性が重要であるため，双方向性反射率分布関数 (BRDF) として獲得する．しかし，4 次元空間で定義される BRDF を獲得するためには複雑な撮影機材が必要となり，データ量も膨大となる．そこで本稿では，低次元で定義される関数で近似することにより，効率良く反射特性を獲得する方法について述べる．

また，学習した反射特性は，単に CG として再現するために利用するのではなく，その二次利用も重要である．本稿では，仮想光学環境 [1] と組み合わせることで，学習した反射特性を異なる形状を持つ物体上にマッピングする応用例を示す．

2　実物体からの反射特性の学習

2.1　双方向性反射率分布関数

実物体の反射特性の学習においては，反射特性の再現性が重要である．そのため，反射モデルを仮定して少数のパラメータで表現するのではなく，実際の観測データをそのまま保存する．なお，反射特性は物体表面の各点ごとに独立して学習する．

物体表面の各点の反射特性を表す関数として，双方向性反射率分布関数 (BRDF)[2] がある．BRDF は Fig.1 に示すように，物体表面の各点における，光源方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光照度に対する視点方向 (θ_r, ϕ_r) への反射光輝度の比率を表す関数である．しかし，物体表面の各点毎に 4 変数の関数として表す必要があるため，データ量が膨大になる．また，全ての光源方向と視点方向の組合せで物体を撮影しなければならないため，複雑な撮影装置が必要となる．従って，BRDF をそのまま獲得するのは容易ではない．

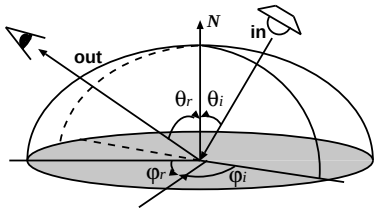


Fig.1 Parameters of BRDF.

2.2　反射特性関数の近似表現

より少ないデータ量で反射特性を学習するために ,BRDF を低次元の空間で定義される関数として近似する方法を考える．実世界の物体の多くは，局所平面上において，表面を法線を中心に回転させても見え方の変化は起こりにくい．そのため，反射特性は ϕ_i と ϕ_r の和 ϕ に依存すると仮定することができ，式 (1) のように反射特性関数 $f_3(\theta_i, \theta_r, \phi)$ で近似することが可能である．ここで i は物体の輝度，L は光源照度を表す．

$$i = f_3(\theta_i, \theta_r, \phi)L \tag{1}$$

しかし，多くの物体においては，ϕ のパラメータも冗長であると考えられる．そこで，θ_i と θ_r の 2 パラメータによって，式 (2) のように BRDF を反射特性関数 $f_2(\theta_i, \theta_r)$ (以下，2 変数反射特性関数と呼ぶ) で近似することが可能である．

$$i = f_2(\theta_i, \theta_r)L \tag{2}$$

本稿では表現能力とデータ量とのトレードオフの関係を考慮し，2 変数反射特性関数として反射特性を学習する．

全てのパラメータの組についてデータを獲得するには，光源位置や視点位置を密に変化させる必要があり，複雑な撮影装置が必要となる．そこで本研究では，視点位置は固定とし，光源位置のみを変化させて反射特性関数を獲得する．視点を固定すると，θ_r の値を変化させて計測できない

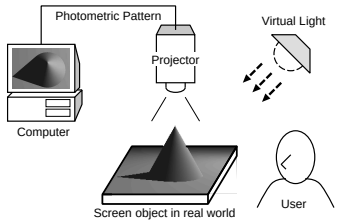


Fig.2 Virtual Photometric Environment.

ため，視点方向と法線方向がなす角ではなく，視点方向と光線の正反射方向のなす角を θ_r として再定義する．

獲得されたデータは離散的であるため，観測データをもとに補間する必要がある．そこで，反射輝度は拡散反射成分と鏡面反射成分の和として表され，拡散反射の輝度変化は θ_r の変化に依存せず，鏡面反射の輝度変化は θ_i の変化に依存しないと仮定する [3] ．また，θ_r がある程度大きければ，鏡面反射が観測されないと仮定する．そこで，鏡面反射が観測されない領域に対して θ_r 方向への線形内挿を行い，拡散反射成分の輝度値を補間する．さらに，観測データの鏡面反射成分を求め，θ_i 方向への線形内挿を行い，鏡面反射成分の輝度値を補間する．なお，線形内挿により補間できない領域は，外挿によって値を推定する．このようにして求めた拡散反射成分と鏡面反射成分の和を得ることで，2 変数反射特性関数を獲得する．

3　仮想光学環境への応用

実物体から学習した反射特性関数は，法線方向に依存していないため，元の物体とは異なる形状の物体表面上で反射特性を再現することもできる．本節では，この特徴を利用した反射特性学習データの応用例について述べる．

3.1　仮想光学環境の原理

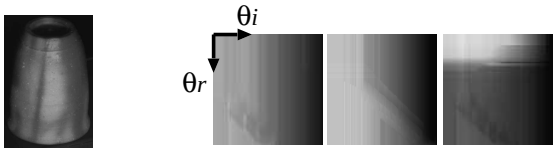
仮想光学環境 [1] とは，実世界の幾何情報と仮想世界の光学情報を実世界で融合することで，見え方の変化をユーザに提示する環境である．Fig.2 に示すように，仮想光源によって実世界中のスクリーン物体上に生じるべき光学現象を，仮想光源とは異なる位置にあるプロジェクタから光学パターンを投影することにより実現する．

3.2　スクリーン物体への反射特性の適用

実物体より学習した反射特性を形状の異なるスクリーン物体に適用する．この時，反射特性を学習した表面上の各点の並びは同一とし，反射特性の分布をマッピングする．そしてプロジェクタより，任意に与えた光源方向及び視点方向に対応する輝度を投影する．この場合，物体の見え方はスクリーン物体の形状に合わせたものでなければならない．しかし，学習した反射特性関数のパラメータは法線との相対角であるため，物体表面の各点の法線方向が分かれば，物体形状に合わせた見え方を再現することができる．

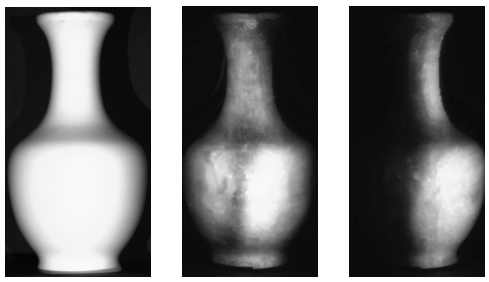
4　実験結果

Fig.3(a) の陶器から 2 変数反射特性関数を獲得し，仮想光学環境において白色石膏の壷に対して投影する実験を行った．獲得した 2 変数反射特性関数を画像として可視化した例を Fig.3(b) に示す．画像の左上を原点として，横方向の変化が θ_i，縦方向の変化が θ_r をそれぞれ表している．このような反射特性関数を，陶器の全ての点に対して獲得した上で，Fig.4(a) の石膏壷に適用した．



(a)Target object.　　(b)$f_2(\theta_i, \theta_r)$.

Fig.3 Acquired photometric properties.



(a)　　(b)　　(c)

Fig.4 Experimental results.

反射特性をプロジェクタによって石膏壷に投影した結果を Fig.4(b)(c) に示す．実物体から学習した反射特性を，形状の異なる物体に対して適用できていることが分かる．また，任意の光源方向と視点方向に対しての反射を再現できていることも分かる．

5　まとめ

本稿では，有形文化財の一例として陶器を取り上げ，その表面の反射特性を学習する方法を示した．4 次元空間で定義される BRDF を，2 次元空間で定義される関数で近似することによって，少ないデータ量で表面反射特性を学習した．また，仮想光学環境において，学習した反射特性を異なる形状のスクリーン物体上で再現できることを示した．今後の課題としては，相互反射の効果を考慮した反射特性の学習などが挙げられる．

本研究の一部は，科学技術振興事業団 CREST 池内プロジェクト，及び科学研究費補助金 (課題番号 14780290) の補助を受けて行った．

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 (2001)

[2] B.K.P.Horn, Robot Vision, The MIT Press, McGraw-Hill Book Company (1986) (NTT ヒューマンインターフェイス研究所プロジェクト RVT (訳): ロボットビジョン -機械は世界をどう視るか-, 朝倉書店, pp.230/232 (1993))

[3] B.Phong: Illumination for computer generated pictures, Commun. ACM, vol.18, pp.311/317 (1975)