

フーリエ級数モデルによる双方向テクスチャ関数学習と 仮想光学環境への応用

江角 直起 右田 剛史 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

E-mail: {migita,shaku}@chino.it.okayama-u.ac.jp

あらまし: 本稿では, カメラと対象物体を固定し光源位置のみを変化させて撮影した画像集合から, 物体表面の反射特性を表現する双方向テクスチャ関数 (BTF) を学習する手法について述べる. 物体表面の各点において, 2変数で近似した双方向性反射率分布関数 (BRDF) をフーリエ級数で表現することにより, 元来6変数であるBTFを4変数で近似し学習する. この方法により, 備前焼を対象物体として4変数BTFを学習し, これを元にImage Quilting法で新たなテクスチャを生成する. 最後に, 生成結果を仮想光学環境に適用した結果を報告する.

BTF Recovery Based on a Fourier Expansion of BRDF and Its Application to Virtual Photometric Environment

Naoki Esumi, Tsuyoshi Migita and Takeshi Shakunaga

Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University

3-1-1 Tsushima-naka, Okayama, 700-8530, JAPAN

Abstract: This paper proposes a method for learning a Bidirectional Texture Function. The BTF defined in 6D parameter space captures the variation in a texture with respect to illumination and viewing directions. We reparameterize it as a simple 4D function, i.e. a 2D array of 2D Bidirectional Reflectance Distribution Functions, which are represented in Fourier serieses. We call it a Fourier Series Model. We combine this model and an image quilting method to produce a realistic BTF for a Bizen Pottery and apply it to the Virtual Photometric Environment.

1 はじめに

複合現実感とは, 実世界の幾何・光学情報と仮想世界の幾何・光学情報を融合する技術であり, 人間が情報を共有する新しい手段として注目されている [1]. この複合現実感を実現するシステムは, 仮想美術館などの幅広い応用が可能であり, 現実感の高いシステムを構成するためには, 写実的な仮想世界の幾何・光学情報が必要である. このため, 実物体から学習される情報に基づき, 仮想世界でその光学情報を再現する研究がなされている [2].

仮想世界の光学情報を表す仮想画像を生成する代表的な方法として, Image Based Rendering が挙げられる. Image Based Rendering では, 数値的な解析を行わずにあらかじめ撮影した画像そのものを用いて仮想画像を生成する. このため, 実画像から得られる情報を直接利用でき, 自然な画像の生成が行

える. Koudelka ら [3] は, Image Based Rendering の枠組の中で, 多量の実画像から物体表面の反射特性を表す双方向テクスチャ関数 (Bidirectional Texture Function: BTF) [4] を学習し, 任意光源方向・任意視点方向の仮想画像生成を行う方法を提案している. BTF は, 法線に対する相対的な角度を引数とし輝度を表現するため, 任意の3次元形状上で実物体の反射を再現することができる. しかし, この手法では, ロボットアームに物体を固定し, 光源位置および物体位置を変化させ撮影した画像を入力とするため, 複雑なロボットアーム・照明装置が必要である.

また, 西山ら [5] および有光ら [6] は, カメラと対象物体を固定し, 光源位置のみを離散的に変化させ撮影した画像集合から, BTF におけるある1点の反射特性を表現する双方向性反射率分布関数

(Bidirectional Reflectance Distribution Function : BRDF) を近似することで、効率的に反射特性を学習する手法を提案している。この手法は、光源位置のみを変化させて撮影した画像を入力とするため、比較的単純な照明装置で反射特性を学習できる。しかし、西山らの手法には、物体表面上に同じ反射特性をもつ点が複数存在すると仮定し、数個のクラスにクラスタリングするため、点毎の微妙に異なる反射を再現できないという問題がある。また、有光らの手法では、未観測データを観測データから線形内挿および外挿で補完するため、反射特性の近似精度が悪くなることもある。

これらの問題を解決するために、本研究では、BRDF の近似関数をフーリエ級数モデルで表現し、BTF を効率よく学習する手法を提案する。フーリエ級数モデルは、Phong モデル [7] を拡張したモデルであり、Phong モデルなどの反射モデルで表現することができない複雑な反射を表現できるという特徴がある。このため、提案モデルを用いることにより、精度よく BTF を学習できる。また、学習した BTF の応用例として、対象物体を備前焼とし、仮想光学環境 [8] の光学パターン生成に適用した結果についても報告する。

2 物体表面の反射特性学習

2.1 双方向テクスチャ関数

物体表面で観測される反射や影などの反射特性を表す光学モデルとして BRDF がある。BRDF は光源方向からの入射光強度 $L(\theta_d, \phi_d)$ と視線方向への反射光輝度 $R(\theta_r, \phi_r)$ の比率を表すモデルであり、観測輝度 s は BRDF を用いて次式のように表される。

$$s = f_B(\theta_d, \phi_d, \theta_r, \phi_r) \quad (1)$$

ここで、光源方向ベクトルと物体表面の法線方向ベクトルがなす角を θ_d とし、光源方向ベクトルを観測点の接平面上へ投影したベクトルと接平面上で定義した参照ベクトルがなす角を ϕ_d とする。また、視線方向ベクトルと法線方向ベクトルがなす角を θ_r とし、視線方向ベクトルを観測点の接平面上へ投影したベクトルと接平面上で定義した参照ベクトルがなす角を ϕ_r とする。図 1 に、光源方向を表す変数 (θ_d, ϕ_d) および視線方向を表す変数 (θ_r, ϕ_r)

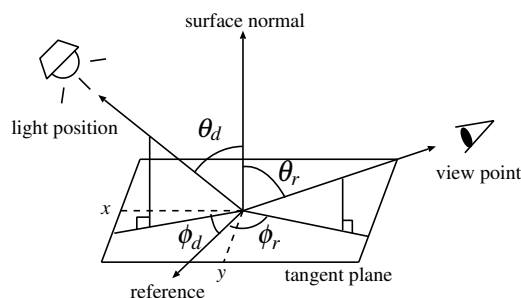


図 1: BRDF・BTF 変数の幾何学的配置

の幾何学的配置を示す。BRDF では、一様な物体表面、あるいは 1 点の反射特性が表現できる。

さらに、BTF を用いることで複数の反射特性が混在する物体表面を表現できる。BTF は、物体表面の各点 (x, y) において BRDF を学習することで表現でき、BRDF の 4 変数に座標 (x, y) を加えた合計 6 変数で表される。

$$s = f_T(\theta_d, \phi_d, \theta_r, \phi_r, x, y) \quad (2)$$

BTF には、BRDF がもつ反射特性に加えて、座標情報をもつため、物体表面のテクスチャを表現できるという特徴がある。

2.2 双方向テクスチャ関数の近似

式 (2) で表される BTF を学習する場合、光源方向と視線方向の両方を変化させて撮影した画像が必要となる。このような画像集合を撮影するためには、複雑な撮影装置 [3] が必要となり、またデータ量も膨大なものとなる。そこで、まず BTF の近似表現を提示し、その表現能力について検討する。

まず、6 変数の関数である BTF の変数を削減し、近似表現する方法について述べる。物体表面で生じる反射は等方性であると仮定することで、元来 4 変数の BRDF を式 (3),(4),(5) のように 3 変数、2 変数および 1 変数で近似表現することができる [5]。

$$s = f_t(\theta_d, \theta_r, \gamma) \quad (3)$$

$$s = f_p(\theta_d, \theta_s) \quad (4)$$

$$s = f_l(\theta_d) \quad (5)$$

ここで、光源方向ベクトルと視線方向ベクトルの 2 等分方向ベクトルと法線方向ベクトルがなす角を γ とし、光源の正反射方向ベクトルと視線方向ベクトルがなす角を θ_s とする。この BRDF の近

似関数を各点で求めることにより, 6 変数の BTF を式 (6),(7),(8) で表される 5 変数, 4 変数および 3 変数で近似表現できる.

$$s = f_5(\theta_d, \theta_r, \gamma, x, y) \quad (6)$$

$$s = f_4(\theta_d, \theta_s, x, y) \quad (7)$$

$$s = f_3(\theta_d, x, y) \quad (8)$$

上記の各 BTF の表現能力について検討する. 3 変数 BTF は, 座標と拡散反射を表す角度しか引数にとらないため, 鏡面反射を正確に表現できない. 一方, 4 変数および 5 変数 BTF は, 鏡面反射を表す角度も引数にとるため, 拡散反射だけでなく, 鏡面反射を表現できる. また, 4 変数および 5 変数 BTF は, Phong モデルや Torrance-Sparrow モデル [9] を拡張したモデルと考えることができる. これらは, Phong モデルなどで表現することのできない複雑な反射も表すことができるため, 表現能力が優れている.

ほとんどの物体の反射特性が Phong モデルや Torrance-Sparrow モデルなどで近似的に表現できることから, 4 変数あるいは 5 変数 BTF で反射特性を表現することは妥当であるといえる.

3 フーリエ級数モデルによる反射特性学習

3.1 フーリエ級数モデル

本研究では, 効率よく反射特性を学習するためのモデルとして, フーリエ級数モデルを提案する. 物体表面の反射特性を表す BRDF は, 連続関数で表現可能であるため, 連続関数を直交関数の和で表すフーリエ級数を用いて表現できる. フーリエ級数は, 周期と位相の異なる正弦波の重ね合わせとして表現するものであり, 任意の関数を近似表現できる. 本研究では, フーリエ級数で BRDF を表現したモデルをフーリエ級数モデルと呼ぶ.

提案モデルでは, 式 (9) に示すフーリエ級数 $f(t)$ で物体表面の各点の BRDF を表現し, BTF を学習する.

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{\sqrt{2}} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp\{j(kt)\} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで, a_k, b_k は第 k 高調波のフーリエ係数を示し, j は虚数単位を示す. また, $\exp\{j(kt)\}$ および c_k はそれぞれ式 (10),(11) のようにおいた.

$$\exp\{j(kt)\} = \cos(kt) + j \sin(kt) \quad (10)$$

$$c_k = \begin{cases} (a_k - jb_k)/2 & k > 0 \\ a_0/\sqrt{2} & k = 0 \\ (a_{-k} + jb_{-k})/2 & k < 0 \end{cases} \quad (11)$$

本研究において, フーリエ係数を反射特性係数と呼ぶ. 反射特性係数 c_k は, サンプリング間隔が等間隔, かつ, サンプル点が 1 つも欠けてない場合, 逆フーリエ変換で推定できる.

$$c_k = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp\{-j(kt)\} dt \quad (12)$$

しかし, 実際にこの条件を満たす実画像集合を撮影することは難しいため, 本研究では最小 2 乗法を用いて係数推定を行う.

3.2 フーリエ級数モデルの定式化

本節では, 3 変数 BRDF および 2 変数 BRDF をフーリエ級数で表現するフーリエ級数モデルについて述べる. まず, 3 変数 BRDF のフーリエ級数モデルについて述べる. 観測輝度は, 拡散反射成分と鏡面反射成分の和で表されると仮定することで, 拡散反射成分は θ_d のみで表現され, 鏡面反射成分は θ_r, γ で表現される. 以上より, 3 変数 BRDF は次式で表される.

$$\begin{aligned} f_t(\theta_d, \theta_r, \gamma) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k^d \exp\{j(k\theta_d)\} \\ &+ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{mn}^s \exp\{j(m\theta_r)\} \exp\{j(n\gamma)\} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで, c_k^d, c_{mn}^s は反射特性係数を示す.

次に, 2 変数 BRDF のフーリエ級数モデルについて述べる. 3 変数 BRDF と同様に, 観測輝度は拡散反射成分と鏡面反射成分の和で表されると仮定することで, 拡散反射成分は θ_d のみに依存し, 鏡面反射成分は θ_s のみに依存することになる. 以上より, 2 変数 BRDF は次式で表される.

$$\begin{aligned} f_p(\theta_d, \theta_s) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k^d \exp\{j(k\theta_d)\} \\ &+ \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m^s \exp\{j(m\theta_s)\} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで, c_k^d, c_m^s は反射特性係数を示す.

上記の2つのフーリエ級数モデルを比較する. 式(13)と式(14)の第2項を比較すると, 2変数BRDFのフーリエ級数モデルの方が単純なモデルになっていることが判る. このため, 2変数BRDFの反射特性係数は, 3変数BRDFの反射特性係数に比べ容易に推定できる. また, 鏡面反射は光源の正反射方向ベクトルと視線方向ベクトルがなす角 θ_s で十分に表現することができるため3変数BRDFは冗長であり, 反射特性の学習は2変数BRDFのフーリエ級数モデルを用いることが適切であると思われる. 以上より, 本研究では, 2変数BRDFのフーリエ級数モデルを用いて4変数BTFを学習する.

3.3 フーリエ級数モデルの次元数

式(14)で表されるフーリエ級数モデルは, 正弦波の無限級数で表現されているが, 実際には適切な次元の高調波までを利用した近似モデルを利用することになる. 本節では, フーリエ級数モデルの次元数について検討する.

まず, 式(14)の第1項および第2項をそれぞれ第 K および M 高調波までを用いて式(15)のように近似する.

$$f_p(\theta_d, \theta_s) \approx \sum_{k=-K}^K c_k^d \exp\{j(k\theta_d)\} + \sum_{m=-M}^M c_m^s \exp\{j(m\theta_s)\} \quad (15)$$

このとき, 式(15)の第1項は, 拡散反射成分を表現していることに着目する. 拡散反射はランバートモデルにより表現できることが知られているため, 式(15)の第1項は $a_0^d = 0, b_1^d = 0, K = 1$ として近似できる. したがって, 式(15)は式(16)のように表現できる.

$$f_p(\theta_d, \theta_s) \approx a_1^d \cos \theta_d + \sum_{m=-M}^M c_m^s \exp\{j(m\theta_s)\} \quad (16)$$

この反射特性係数は, 式(17)で表される評価関数 E を最小化することで推定される.

$$E = \sum_{n=1}^N |r_n|^2 \quad (17)$$

ここで N は入力画像枚数, r_n は光源位置 n における観測輝度値と推定輝度値の残差を示す. 提案モデルは, Phongモデルを拡張したモデルであり, 上記のように係数と次元数を設定することで, 効率よく4変数BTFを学習できる.

3.4 フーリエ級数モデルの正則化

3.3節において反射特性係数は, 式(17)に示す2次の評価関数を最小化することで推定されることについて述べた. したがって, 反射特性係数は, 実画像が $N(\geq 2M + 2)$ 枚以上与えられると, 線形最小2乗法で推定できる. しかし, 実画像に含まれるノイズ成分の影響により反射特性係数の推定が不安定になることがある. これを避けるために, 正則化を導入する.

式(16)において, 拡散反射成分を表現している第1項は安定に推定ができるため, 第2項に対してのみ正則化を行う. まず, 式(16)の第2項を $g(\theta_s)$ とおく. このとき, 関数 $g(\theta_s)$ を滑らかにするためには, 関数 $g(\theta_s)$ の1次微分の2次ノルムが0に近づくようにすればよく, これはパーセバルの式によって, 式(18)のように書ける.

$$\int_{-\pi}^{\pi} |g'(\theta_s)|^2 d\theta_s = \pi \sum_{m=1}^M m^2 ((a_m^s)^2 + (b_m^s)^2) \quad (18)$$

以上のことに基づき, 式(17)に正則化項を付加した式(19)を評価関数 E_r として用いる.

$$E_r = \sum_{n=1}^N |r_n|^2 + \lambda \sum_{m=1}^M m^2 ((a_m^s)^2 + (b_m^s)^2) \quad (19)$$

ここで, λ は正則化定数を示す. 反射特性係数は, 評価関数 E_r を最小化する係数として線形最小2乗法で推定できる.

4 仮想光学環境への応用

4.1 仮想光学環境の概要

フーリエ級数モデルで学習したBTFの応用例として, 仮想光学環境の光学パターン生成への適用が挙げられる. 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対象物体の見え方の変化をユーザに提示する環境である. 図2のよ

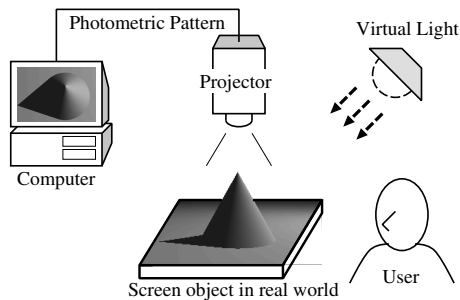


図 2: 仮想光学環境の概念図

うに、仮想光源によって実世界中の3次元物体(スクリーン物体)上に生じるべき光学現象を表す光学パターンを生成する。そして、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仮想光学環境を実現できる。この環境では、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可能である。

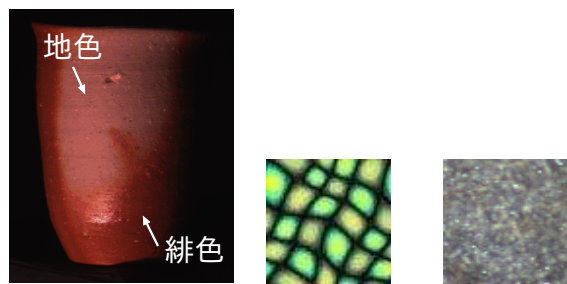
この環境において、より高い現実感を実現するためには、実物体から学習した光学パターンが必要となる。このため、物体表面のBTFをフーリエ級数モデルで学習し、反射を再現することにより、写実的な光学パターン生成を試みた。

4.2 光学パターン生成

4.2.1 光学パターン生成の概要

光学パターンとは、仮想光源によって照らされたスクリーン物体をプロジェクタの位置から観測した見え方を表す画像である。本研究では、図3(a)に示す備前焼緋襷(ひだすき)を対象物体として、3章において述べたフーリエ級数モデルで物体表面のBTFを学習し光学パターン生成を行う。しかし、対象物体とスクリーン物体の大きさは異なるため、対象物体のBTFをそのままスクリーン物体に割り当てることは難しい。したがって、対象物体のテクスチャからスクリーン物体の大きさの新たなテクスチャを生成し反射を再現する必要がある。

近年、任意画像サイズのテクスチャを生成する手法が幅広く研究されており、様々な手法が提案されている[10][11]。これらの手法は、類似するブロックの探索によってテクスチャを生成し、図3(b)(c)に示すような統計的な性質をもつテクスチャを質感高く生成することができる。しかし、図3(a)に



(a) 備前焼緋襷 (b) 鱗模様 (c) 備前焼胡麻

図 3: テクスチャの種類

示す備前焼緋襷は、陶器の表面に緋色の筋が通る大域的な模様をもつため、局所的な特徴に着目している従来のテクスチャ生成法では対応できない。ここで、大域的な模様を構成する緋色領域と地色領域に着目すると、それぞれの局所領域は、統計的な性質をもつため、従来法でテクスチャを生成できる。そこで、本研究では、以下に示す3つのステップで備前焼緋襷の光学パターン生成を行う。

1. テクスチャを反射特性毎に領域分割
2. 反射特性領域毎に新たなテクスチャを生成
3. 新たに生成したテクスチャを重み付け和により統合

以下で各ステップについて述べる。

4.2.2 異なる反射特性領域の分割

まず、対象物体のテクスチャを反射特性毎に領域分割する。備前焼緋襷の模様は緋色領域および地色領域から構成されるため、本研究では色情報を利用し領域分割を行う。

対象物体表面の各点において法線方向が異なるため、観測される輝度は一定ではない。このため、輝度の影響を受け、安定に領域を分割するのは難しい。そこで、カメラと対象物体を固定し、光源位置のみを変化させて撮影した画像列から平均画像を作成し、輝度の影響を減少させる。

次に、反射特性領域毎に1点づつ代表点を手動で指定し、最近傍法で領域分割を行う。以上の手順により、反射特性毎に領域を分割する。

4.2.3 反射特性領域毎のテクスチャ生成

反射特性毎に領域分割したテクスチャから、大きな画像サイズの新たなテクスチャを生成する。本研究では、テクスチャ生成法として、図3(b)のような細かい模様を生成できるだけでなく、図3(c)のような比較的大きな模様も生成できる Image Quilting (IQ) 法 [11] を利用する。IQ 法は、入力画像中の類似するブロックを探索しテクスチャを生成する。

また、本研究では、対象物体の反射特性を表現できるように平均画像の RGB 値ではなく、フーリエ級数モデルの反射特性係数を画素値とする反射特性係数マップを入力とし生成する。さらに、同じ反射特性領域内のみを探索範囲とすることで、その領域におけるテクスチャ生成を行う。

4.2.4 重み付け和による各領域の統合

反射特性領域毎に生成した反射特性係数マップに対して、光源位置、視点位置および法線方向を与えレンダリングすることで輝度を決定する。そして、各領域のレンダリング画像を重み付け和によって統合し、新たな緋色と地色の模様を生成する。重み付け和による各領域の統合は次式で行う。

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^n \alpha_{xyi} I_{xyi}, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_{xyi} = 1 \quad (20)$$

ここで、 I_{xy} は統合した画像の画素 (x, y) における輝度値、 I_{xyi} は i 番目の領域から生成したレンダリング画像の輝度値、 n は異なる反射特性の数、 α_{xyi} は i 番目のレンダリング画像の重みを示す。

重み付け係数 α_i を可視化した画像を重みマップと呼ぶ。この重みマップは各反射特性領域の分布や混合比率を表し、この重みマップを自由に变化させることにより、絵柄など様々な模様をユーザが指定できる。

5 実験

5.1 反射特性の学習と表現能力の比較

備前焼緋襷の反射特性をフーリエ級数モデルで学習する実験を行った。学習画像は、カメラを対象物体正面に固定し、光源位置を高さ方向 6 段階、横方向 55 段階 (3 度刻み) 変化させて撮影した 330 枚の画像である。学習画像の一部を図 4 に示す。あ

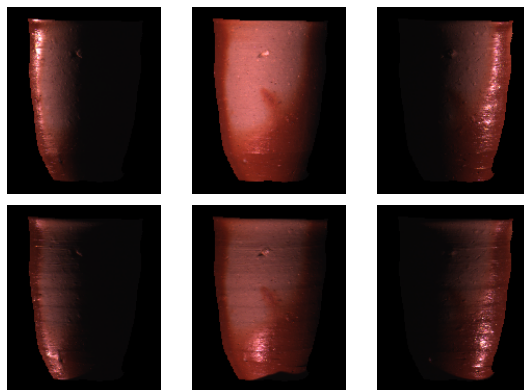
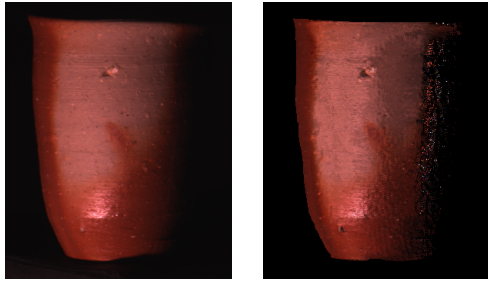


図 4: 学習画像の一部

らかじめ、撮影時のカメラ位置および光源位置は実測し、対象物体の 3 次元形状はカメラとプロジェクタでレンジファインダを構成し、空間コード化光投影法 [12] で復元した。

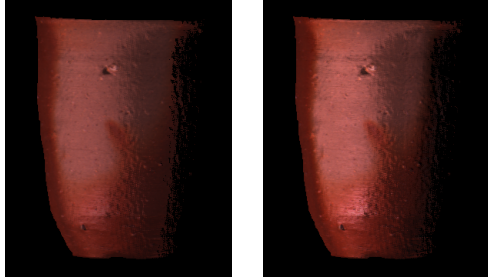
まず、フーリエ級数モデルにおける次元数 M と正則化定数 λ の検討を行った。モデルの次元数と正則化定数を変化させ、学習画像に含まれていない画像 (図 5(a)) の反射を再現したときの RMS 誤差グラフを図 6 に示す。このグラフにおいて、縦軸は RMS 誤差、横軸は次元数 M を表す。正則化を用いない場合 ($\lambda = 0$ (実線)) の RMS 誤差は、5 次元で最も小さくなり、5 次元より高次元では大きな値となった。図 5(b) に $M = 15, \lambda = 0$ として再現した結果を示す。この画像では、右側部の拡散反射の暗い領域を正しく再現できておらず、また、中央左側の地色領域はざらつきのある再現結果となった。これは、 $\lambda = 0$ では、高次元の係数推定が不安定となり、その結果、再現精度が悪くなったものと考えられる。

一方、正則化を導入し推定した $\lambda = 0.5$ (点線)、 $\lambda = 3.14$ (破線)、 $\lambda = 10$ (1 点破線)、 $\lambda = 50$ (2 点破線) の RMS 誤差は、10 次元までは減少し、10 次元より高次元ではほぼ変化していない。このことより、正則化を行うことで高次項の係数を安定に推定できることがわかる。しかし、 $\lambda = 10, 50$ として再現したときの RMS 誤差は、 $\lambda = 0.5, 3.14$ として再現した場合と比較し大きな値となった。図 5(c) に $M = 10, \lambda = 50$ として再現した結果を示す。この再現結果では、中央下部の緋色領域の鏡面反射が消えている画像になっている。このことより、正則化定数 λ が大きすぎると、鏡面反射の再現精度が悪くなり、RMS 誤差が大きくなることがわかる。また、図 5(d) に $M = 10, \lambda = 3.14$ と



(a) 正解画像

(b) $M = 15,$
 $\lambda = 0$



(c) $M = 10,$
 $\lambda = 50$

(d) $M = 10,$
 $\lambda = 3.14$

図 5: 次元数と正則化定数による再現結果の比較

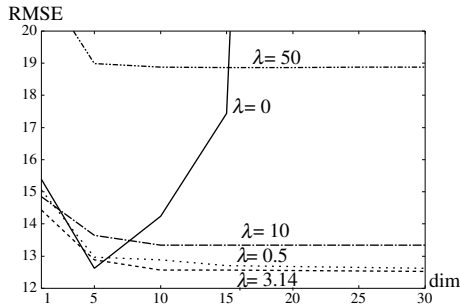


図 6: 次元数と RMS 誤差の比較

して反射を再現した結果を示す。この画像では、鏡面反射が若干弱くなっているものの、概ね再現できていることがわかる。以上のことより、適切な次元数および正則化定数を設定する必要があることが判る。また、今回の対象物体に対しては、RMS 誤差および目視により、高調波の次元数 $M = 10$ 、正則化定数 $\lambda = 3.14$ が妥当であることがわかった。

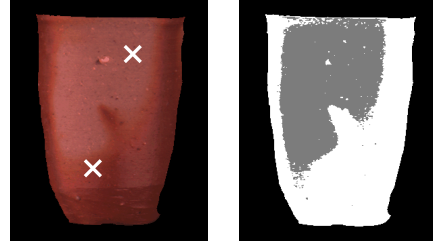
以上の目視および定量評価により、提案モデルを用いることで精度よく反射特性を学習できることが確認できた。

5.2 光学パターン生成と実物体への投影

5.1 節で学習した BTF を用いて、備前焼緋襷の光学パターン生成を行い、生成した光学パターン



図 7: スクリーン物体



(a) 平均画像

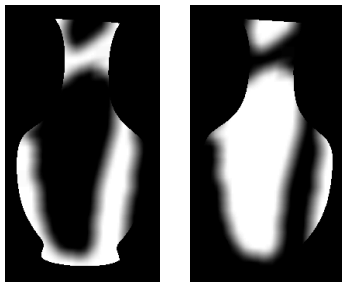
(b) 領域分割結果

図 8: 各反射特性の領域分割結果

を実際にプロジェクタを用いてスクリーン物体へ投影した。スクリーン物体としては、図 7 に示す白色石膏の壺を用いた。壺の形状は、空間コード化光投影法で復元した。

まず、備前焼緋襷のテクスチャを 4.2.2 節において述べた手順で反射特性毎に領域分割を行った。図 8(a) に平均画像、(b) に分割結果を示す。平均画像は、5.1 節で用いた学習画像から作成し、各反射特性領域の代表点は、図 8(a) 中の \times 印とした。この分割結果の画像では、緋色領域を白く、地色領域を灰色で表現している。物体中央の地色領域で誤って緋色領域と分類されている領域があるものの、概ね反射特性毎に領域分割できていることが目視により確認できる。

次に、同じ反射特性領域内を探索範囲とし Image Quilting 法でテクスチャ生成を行い、スクリーン物体の形状、視点位置および光源位置を与え反射を再現した。そして、反射特性領域毎に生成した画像を重み付け和により統合した。図 9(a),(b) に緋色領域および地色領域の重みマップを示す。なお、この重みマップでは、重みが小さい $\alpha = 0$ を黒く、重みが大きい $\alpha = 1$ を白く表示している。重みマップによる統合結果を図 10 に示す。この結果から、重みマップで指示した模様が生成できていることがわかる。緋色領域と地色領域の様子は、実際の備前焼緋襷と異なるものの、反射を BTF に



(a) 緋色領域 (b) 地色領域

図 9: 重みマップ



図 10: テクスチャ統合結果



図 11: プロジェクタによる光学パターン投影結果

より再現するため、備前焼緋襷らしい壺を生成できていることが確認できる。

最後に、テクスチャの統合結果を光学パターンとし、実際にプロジェクタを用いて光学パターンをスクリーン物体に投影した。光学パターンが投影されたスクリーン物体の見え方を図 11 に示す。この結果より、白色のスクリーン物体が、備前焼緋襷の反射特性をもつ壺として表現されていることがわかる。

以上の実験結果より、備前焼緋襷については BTF をフーリエ級数モデルで学習し、光学パターンにおいてその反射を再現できることを確認した。また、反射特性領域毎にテクスチャを生成し、重み付け和により統合することで、実物体の模様と異なる新たな模様を生成できることを確認した。さらに、生成した光学パターンをスクリーン物体に投影することで、高い現実感を得られる仮想光学環境が実現可能であることを確認した。

6 まとめ

本研究では、物体表面の BTF を精度よく学習するモデルとしてフーリエ級数モデルを提案した。また、学習した BTF の応用として光学パターン生成を行い、仮想光学環境に適用した。実験により、提案モデルを用いることで精度よく BTF を学習でき、写実的な光学パターンを生成できることを確認した。

今後の課題として、異なる反射特性の自動クラスタリングなどが挙げられる。

本研究は、科学技術振興機構 CREST 池内プロジェクトの援助を受けて行った。研究の初期において助言頂いた向川康博助教授、研究に協力して頂いた浅利圭介氏に感謝します。

参考文献

- [1] R. Raskar, G. Welch and W.C. Chen, "Table-Top Spatially-Augmented Reality: Bringing Physical Models to Life with Projected Imagery," Proc. International Workshop on Augmented Reality '99(IWAR'99), pp.64-71, 1999.
- [2] 池内克史, 佐藤洋一, 西野恒, 佐藤いまり, "複合現実感における光学的整合性の実現," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌「複合現実感」特集号, vol.4, no.4, pp.623-630, 1999.
- [3] M.L. Koudelka, S. Magda, P.N. Belhumeur and D.J. Kriegman, "Acquisition, Compression, and Synthesis of Bidirectional Texture Functions," The 3rd international workshop on texture analysis and synthesis, pp.59-64, 2003.
- [4] K.J. Dana, B. van Ginneken, S.K. Nayar and J.J. Koenderink, "Reflectance and Texture of Real-World Surfaces," ACM Trans. Graphics, vol.18, no.1, pp.1-34, 1999.
- [5] 西山正志, 向川康博, 尺長健, "仮想光学環境のための局所反射特性分布の学習と再現," 情処研報 CVIM-132-9, pp.61-68, 2002.
- [6] 有光博志, 向川康博, 尺長健, "陶器の反射特性学習と仮想光学環境への応用," 計測自動制御学会第 3 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2002), pp.289-290, 2002.
- [7] B.T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," Commun. ACM, vol.18, pp.311-317, 1975.
- [8] 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.
- [9] S.K. Nayar, K. Ikeuchi and T. Kanade, "Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives," IEEE Trans. PAMI, vol.13, no.7, pp.611-634, 1991.
- [10] L.Y. Wei and M. Levoy, "Fast Texture Synthesis using Tree-structured Vector Quantization," Proc. SIGGRAPH 2000, pp.479-488, 2000.
- [11] A.A. Efros and W.T. Freeman, "Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer," Proc. SIGGRAPH 2001, pp.341-346, 2001.
- [12] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.