

能衣装のデジタルコンテンツ化のための布物体モデリングと可視化

武田 祐樹 田中 弘美
立命館大学 情報理工部

能は約 400 年の歴史があり、その伝統ある能面・能衣装は貴重な文化遺産である。現在、文化遺産をデジタルアーカイブ化し、後世に伝える研究が行われている。そこで本研究では、能衣装のデジタルコンテンツ化のために、高精細な画像計測と分析に基づく効率的な布物体モデリングと可視化法を提案する。能衣装布は、植物・動物など複雑で多彩な柄模様が、絹をはじめ金糸・銀糸を含む多様な材質と色の糸により織られ、あるいは刺繍されており、それぞれの色柄領域が固有の異方性反射特性をもつ。まず、入力画像に対して色差を用いて各色柄領域に分割する。分割後の領域から画像中に占める面積により規則的なテクスチャを持つ地柄領域と不規則的なテクスチャを持つ模様柄領域に分類する。不規則的な模様柄領域に対しては、多視点画像を用いて観測した反射光分布を分析し、各色領域固有の色と反射特性を表す BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)を生成する。また、規則的な地柄領域に対しては、各画像で領域内の小面積の地柄テクスチャを拡大することにより BTF(Bidirectional Texture Function)を生成する。獲得した BRDF、BTF 及びテクスチャから能衣装布全体の BTF を生成しレンダリング結果を確認した。

Cloth Object Modeling and Visualization to Generate Digital Contents of Noh Costumes

Yuki Takeda Hiromi T. Tanaka
College of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

We propose the method of cloth object modeling and visualization to create digital contents of the Noh costumes. Noh is a historical play for 400 years and Noh masks or Noh costumes are precious cultural heritage. Currently, some researchers group grapple with digital archiving of cultural heritages to save them. In this paper, we propose efficiently image-based method of cloth object modeling and visualization to generate digital contents of Noh costumes.

1. まえがき

最近ではコンピュータグラフィクス(CG)・コンピュータビジョン(CV)研究による 3 次元視覚情報処理技術の進展により、貴重な文化財や文化遺産のデジタル記録・保存、デジタルアーカイブ化・コンテンツ化の研究が精力的に進められている。博物館等の所蔵する資料や文化財には、能衣装や衣装等の様々な布物体が存在する。素材に固有の布物体の変形、光沢や質感は独特であり、これを忠実に再現することが CG や CV における重要な課題である。

能衣装は絹織物で金・銀糸が織り込まれ、さらに植物・動物等の刺繍が施されており、独特の光沢と様々な柄をもつ布素材である。能衣装の反射・透過特性は入射・視方向により大きく変化するため、その光沢を表現するためにテクスチャマッピングするだけでは不十分である。

従来からテクスチャを持つ物体表面の反射特性は、双方向テクスチャ関数(BTF: Bidirectional Texture Function)[2]により記述される。Dana ら

は平行光源下で放物面鏡を用いた BTF 計測装置を開発した[3]。Muller らは BTF 計測装置を開発し、計測からレンダリングまでの一連の方法を提案した[7]。しかしいずれの装置も観測可能な入射・視方向は限られている。一方 Muller らは多数の光源・カメラを設置した装置を開発し 3 次元形状及び BTF を獲得した[6]。しかし BTF を記述するためには膨大な観測画像を必要とする。Filip らは獲得した BTF データの各テクセルを Lafortune モデル[5]でフィッティングレンダリングした[4]。Schneider は BTF データに対し PCA を用い分析・圧縮してリアルタイムにレンダリングした[8]。関根らが提案した手法はセーターや花柄のタオル生地といった光沢の少ない布素材を対象とし、マクロ柄に対しテクスチャ生成を行った[9]。いずれの手法も対象物体が規則的な柄を持つため、対象物体の一部のテクスチャに注目し反射光を計測すればよい。

本研究で対象とする能衣装布は、植物・動物など複雑で多彩な柄模様が、絹をはじめ金糸・銀糸を含む多様な材質と色の糸により織られ、あるいは刺

繡されており、それぞれの色柄領域が固有の異方性反射特性をもつ。能衣装の柄を忠実に再現するためには実物の全テクスチャ情報が必要となるため、獲得する BTF データが膨大になる問題点がある。そこで本手法では、入力画像に対して色差を用いて各色柄領域に分割する。分割後の領域から画像中に占める面積により規則的なテクスチャを持つ地柄領域と不規則的な模様柄領域に分類する。不規則的な模様柄領域に対しては、多視点画像を用いて観測した反射光分布を分析し、各色領域固有の色と反射特性を表す BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)[10]を生成する。また、規則的な地柄領域に対しては、各画像で領域内の小面積の地柄テクスチャを拡大することにより BTF を生成する。そのため、能装束布の BTF を表現するための獲得データ量を削減し且つ不規則な柄を持つ布物体の異方性反射特性を効率的に表現することができる。実験では、入射方向を変化させ各色柄領域の BRDF を獲得する。しかし、金糸が含まれる地テクスチャ領域はカメラの解像度により基本地と分割できないため、一つの規則的な地柄領域として扱う。小領域の規則的なテクスチャから任意サイズのテクスチャを生成する手法[1]を用いて、任意サイズの地テクスチャ領域における BTF を生成する。獲得した BRDF, BTF 及びテクスチャから能衣装布全体の BTF を生成しレンダリング結果を確認した。

2. 双方向テクスチャ関数(BTF)の獲得

物体表面の任意の点における反射特性は双方向テクスチャ関数(BTF: Bidirectional Texture Function)で表現できる。BTF は物体表面の任意の点 (u, v) において、入射方向 $L = (\theta_i, \phi_i)$ からの放射照度に対する視方向 $V = (\theta_r, \phi_r)$ への放射輝度の比として定義される。

$$f_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, u, v) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, u, v)}{L_r(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1)$$

ただし、 N を法線ベクトル、 θ_i を入射角、 ϕ_i を入射方位角、 θ_r を視角、 ϕ_r を視方位角とする。なお、物体表面上の一点における反射特性は双方向反射分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)で表現できる。BTF の表現の内、点 (u, v) に注目した関数であると考えることができる。

BTF を計測データから得るためには、任意の入射方向、視方向に加えテクスチャ上の任意位置に対する反射光データを獲得する必要がある。能衣装のように微細かつ精巧に作られたものは高精細な解像度も必要である。よって能衣装の BTF を獲得するためには膨大な画像データを必要とする。

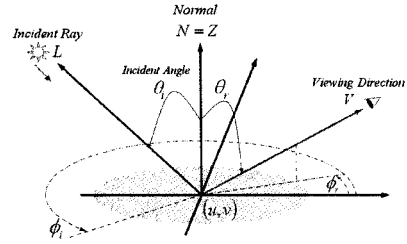


図 1 : BTF 幾何

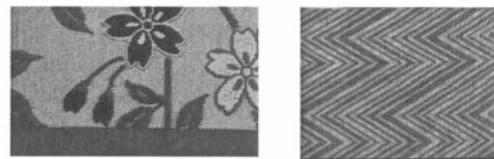


図 2 : 全方位型光学異方性反射測定装置(OGM)

図 2 に、本研究の BTF 獲得のために使用した全方位型光学異方性反射測定装置(OGM: Optical Gyro Measuring Machine)を示す。画像計測には解像度 2272×1704 ピクセル、有効画素数約 400 万画素のデジタルカメラ Canon Power Shot S40 を使用した。光源には朝日分光(株)のキセノン光源 Lax-102 を使用した。OGM は、光源 2 軸、カメラ 1 軸、ステージ 1 軸、合計 4 軸の回転自由度を持つ。これらの自由度を組み合わせることにより、対象物に対しあらゆる入射方向、視方向からの反射光計測が可能である。

3. 能衣装

図 3 に今回の提案手法で対象とする 2 種類の能衣装布を示す。図 3 (a) に示す能衣装の断片は朱色糸の基本地に金糸が織り込まれ、さらに青・緑・白色等の糸で花・葉・枝の刺繍が施されている。図 3 (b) に示す能衣装布の断片は紫色糸の基本地に金糸が織り込まれている。いずれの能衣装布も本来のテクスチャサイズは数十 cm \times 数十 cm から数十 cm \times 数 m ある。しかし、これまでの BTF に関する研究[2,3,4,6,7,8,9]では数 cm \times 数 cm のテクスチャサイズを扱い、能衣装布のテクスチャサイズは大きく対象外である。テクスチャサイズの大きさのため、計測時間の長さや計測データの膨大さが問題点となる。



(a) 花模様 (b) Z字柄

図 3 : 能衣装布の断片

4. 能衣装布のデジタルアーカイブ化

能衣装布の観測画像から各柄色領域の反射特性を抽出し、BTFを効率的に表現する手法を述べる。

能衣装は金糸・銀糸や原色の糸等による鮮やかな配色がされている。このため使用されている各色間に大きな色差があるため、この色差に基づいた領域分割を試みる。図3(a)に示した能衣装に対して色差を用いて領域分割を行い、各色領域で均一の反射特性(BRDF)を持つと近似すればBTFのデータを削減できる。ただし、金糸が含まれる領域に関しては基本地の朱糸系と金糸の分離が困難なため、金糸と朱糸系の混ざった一つのテクスチャ領域とする。この金糸と朱糸系のテクスチャ領域は小領域のテクスチャから継ぎ目の無い拡大テクスチャを生成し、BTFの入力となる画像データを圧縮する。図3(b)に示した能衣装布に対しては、領域分割結果を用い、各色領域に拡大テクスチャを生成する。

4.1 色差に基づく色模様領域・地柄領域分割

本研究では、領域分割の手法として色差に基づきマハラノビス距離を評価しクラスタリングを行った。図3(a)に示すような能衣装は色彩が鮮やかで、隣り合う色領域には大きな色差が見られる。色差に基づき領域分割をするために、各色領域で色分布を調べた。図4に示すように、図3(a)の花模様の能衣装に対し白色AAA昼白色の蛍光灯で均等に光を当て撮影した画像をL*a*b*空間に変換したものである。各色で分布位置が分かれており、色差に基づいてクラスタリング可能である。

クラスタリングはマハラノビス距離を評価基準とする。図4に示した色空間上の各色の点は正規分布をしておらず、k-mean法ではクラスタリングが困難である。我々はマハラノビス距離を用いて、色の分布形状に依らないクラスタリングを行う。以下にクラスタリングの手順を記述する。

1. 能衣装布の撮影画像の各画素値をRGB表色系からL*a*b*表色系に変換する。
2. 全画素から色差 Δ が Δ_0 未満の集合群 S を形成する。また $\Delta_i = \Delta_0 + 1$ とする。
3. S の内、メンバ数の多い集合を上位 i 番目まで取り出す。
4. i 個の集合に対し、各集合の平均色を比較し、色差 Δ_i 未満であれば統合し、 $\Delta_i + 1$ とする。
5. 集合の数が n 個になるまで2~4を繰り返す。
6. n 個の集合を初期集合とし、マハラノビス距離を用いて上位 i 番目以降の集合をクラスタリングし領域を抽出する。

ただし、今回の実験では i を100、図3(a)の花模様の能衣装に対しては n を7、図3(b)のZ字柄の能衣装に対しては n を2とした。

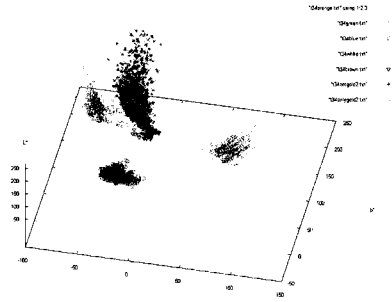


図4: L*a*b*空間の色分布

4.2 地柄領域のBTF生成

領域分割後、金糸の含まれる領域は金糸と朱糸系の混ざった一つのテクスチャ領域として扱う。このテクスチャ領域は能装束布の面積に対して占める面積が大きく、規則的な繰り返しをもつ小さいテクスチャを用いて表現可能である。決められたサイズのテクスチャからつなぎ目の無い任意サイズのテクスチャを生成する方法が提案されている[1,11]。出力となるテクスチャ画像中の注目ピクセルにおいて、その近傍に最も類似したピクセル領域を参照テクスチャ画像中から探索し参照する。この処理を出力となるテクスチャ画像中の全ピクセルにおいて計算することで任意サイズのテクスチャが生成できる。しかし全探索に時間を要するため、Weiら[11]により、木構造ベクトル量子化を用いて探索時間を縮小する手法が提案された。一方、Ashikhmin[1]により探索する候補を削減しさらに高速化した手法が提案された。

本研究では、Ashikhminの手法[1]を用い、金糸を含む領域に対しテクスチャ生成し、効率的にBTFを生成する。図5にAshikhminの手法で用いられる探索アルゴリズムを示す。出力画像中において、生成済み領域を灰色、未生成領域を白色とする。注目ピクセルの近傍の内、生成済み領域に含まれる各画素の参照位置から注目ピクセルに対応する位置を計算し候補とする。候補の内、近傍のテクスチャが最も類似した参照テクスチャ中のピクセルを注目ピクセルに割り当てる。以上の処理を出力画像中の全ピクセルに対して行う。

4.3 模様柄領域のBRDF生成

領域分割により、金糸領域と各色の刺繍領域に分割できる。しかし、刺繍の施された各色領域の反射特性と、刺繍による表面の微細な凹凸形状を忠実にモデル化するのは困難である。

そこで本手法では、刺繍糸による微細な凹凸形状を、手動で作成した Displacement Map により表現する。Displacement Map とは、物体表面を法線方向に微小距離だけ移動させて凹凸の表示を行う手法である。

各刺繍領域の反射特性は、視点を固定し入射方向を変化させて獲得した反射光の観測画像集合を分析することにより抽出する。これらの反射特性を、筆者らが提案した固定光源下多視点画像を用いる BRDF 生成法[10]を用いて、各刺繍領域の BRDF を自動生成する。BRDF の性質として入射方向と視方向は相互に入れ替えても同じ性質を持ったため、固定視点における任意入射方向での獲得画像からでも BRDF を生成することが可能である。

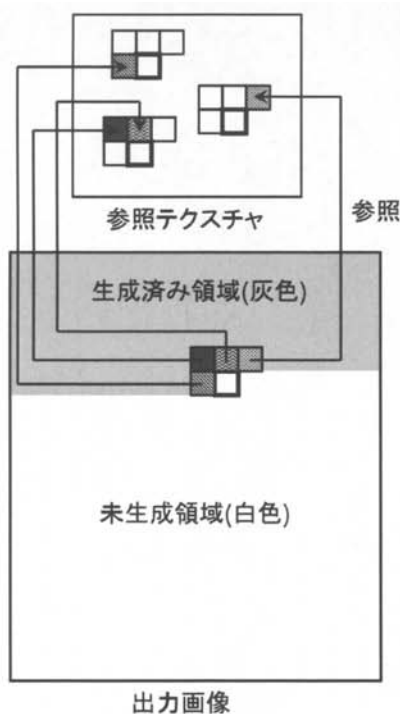


図 5：テクスチャ生成手法

5. 実験

まず、視方向を対象に対し真上と固定し、光源を任意方向に変化させた。視方向が固定なため、画像に含まれる対象の位置は変化しない。この条件下で観測した画像に対し領域分割、テクスチャ生成、レンダリングを行った。

次に、任意視方向における観測画像間の対応付けの問題点について述べる。

5.1 固定視点下における可視化

まず OGM の周囲に白色 AAA 昼白色の蛍光灯で均等に能衣装の断片に照明を当てる。対象に

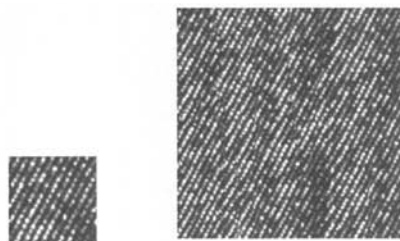
対し真正面から撮影したテクスチャ画像に対し、 $L*a*b*$ 空間の色分布を作成し、領域分割を行った。図 6 に、図 3 (a)の能衣装に対する各色領域の抽出結果を示す。

領域分割後、図 3 (a)の能衣装の金糸・朱色系の混合領域、及び図 3 (b)の能衣装の金糸と紫系の 2 領域に対しテクスチャ生成を行った。図 7 に図 3 (a)の能衣装の朱色系の混合領域に対するテクスチャ生成結果を示す。なお、テクスチャを生成しない領域は同領域中の中間色を反射光とした。

以上の処理を OGM により獲得した全画像に対して行い BTF を生成した。さらに図 3 (a)の花・葉・枝部分は刺繍のために高さを持つため、手動で生成した Displacement Map を与えその法線情報から高さ情報を計算した。図 8 に生成した BTF 及び Displacement Map を用いてレンダリングした結果を示す。図 8 (a), (b)に示す結果画像は、金糸領域においてテクスチャ生成結果も継ぎ目が無く滑らかに見え、リアリティのある結果が得られた。図 8 (c), (d)に示す結果画像は、マクロな Z 字柄があり同色領域中にテクスチャでかつ異方性反射特性を持ち、BTF 生成結果の効果が見られる。図 9 には得られた実画像を示す。図 9 (a)は花模様の能装束布の実画像の一部を示している。金糸領域において、図 8 (a), (b)と図 9 (a)を比べるとよく似ていることが確認できる。図 9 (b)は Z 字柄の能装束布の実画像の一部を示している。実物には画像の中央辺りにシワが見られる。



図 6：色領域抽出結果



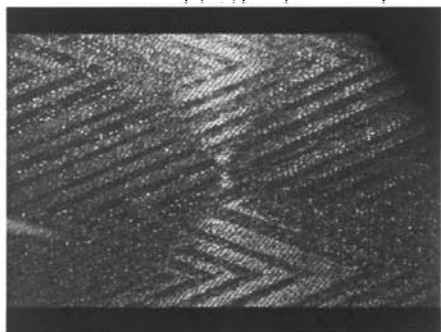
(a)参照テクスチャ(64x64) (b)生成テクスチャ(200x200)
図 7：テクスチャ生成結果



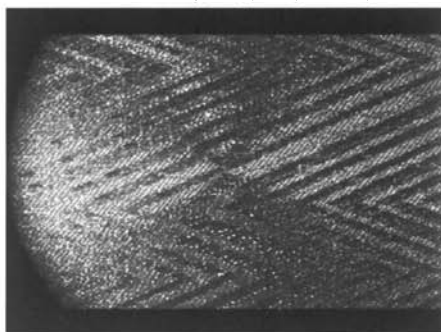
(a) 花模様 $(\theta_i, \phi_i) = (45^\circ, 0^\circ)$



(b) 花模様 $(\theta_i, \phi_i) = (45^\circ, 100^\circ)$



(c) Z字柄 $(\theta_i, \phi_i) = (45^\circ, 0^\circ)$

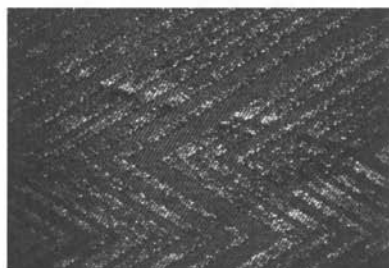


(d) Z字柄 $(\theta_i, \phi_i) = (45^\circ, 100^\circ)$

図 8：レンダリング結果



(a) 花模様



(b) Z字柄

図 9：実画像

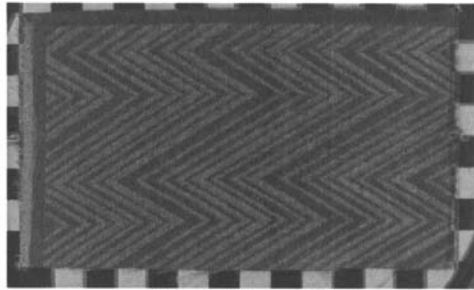
5.2 任意視点下における観測画像間の対応付け

視方向の変化に伴い、能装束布の画像中の位置が変化する。ただし、装置に固定の射影変換であるため、カメラキャリブレーションを行い、能装束布を真正面から観測した画像に変換し対応付けする。図 10 に真正面からの観測画像と異なる視方向における観測画像を平均した画像を示す。図 10(a),(b)から、視角 θ_r の変化が大きくなるにつれて、一致していない。しかし、図 10(c)から視方位角 ϕ_r の変化に対しては一致している。

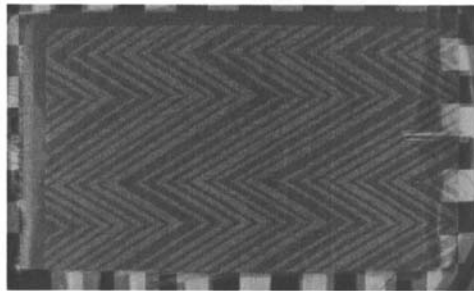
6. あとがき

能衣装のデジタルコンテンツ化のための布物体モデリングと可視化手法を提案した。入力多視点画像に対して色差を用いて各色柄テクスチャ領域に分割した。規則的な柄領域に対しては従来法を用い BTF を生成し、不規則的な柄領域に対しては領域の中間色から BRDF を生成した。次に入射方向を変化させ各色領域の反射特性を獲得した。小領域の規則的なテクスチャから任意サイズのテクスチャを生成する手法を用いて、任意サイズの地テクスチャ領域における BTF を生成した。獲得した反射特性及びテクスチャから能衣装の BTF を生成しレンダリング結果を確認した。

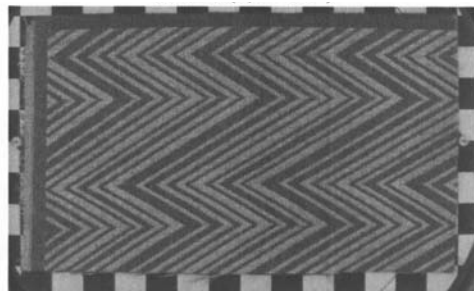
今後、刺繍部分の高さ情報の自動獲得を行う。また任意視点における画像間の対応付けの精度を上げ画像解析を行う。



(a) 視角 ($\theta_r = 60^\circ$)



(b) 視角 ($\theta_r = 80^\circ$)



(c) 視方位角 ($\phi_r = 45^\circ$)

図 10 : 異なる視方向における観測画像間の対応付け

参考文献

- [1] M. Ashikhmin, "Synthesizing Natural Textures," The proceedings of 2001 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, March 19-21, pp. 217-226, 2001
- [2] Dana K. J., Van Ginneken B., Nayar S. K., Koenderink J. J., "Reflectance and texture of real-world surfaces", ACM Transactions on Graphics, No. 8, Vol. 1, pp.1-34, 69, 73, 1999
- [3] Dana K. J., Van Ginneken B., Nayar S. K., Koenderink J. J., "BRDF/BTF measurement device", IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Vol. 2, pp. 460-466, 2001

[4] J. Filip, M. Haindl, "Non-linear Reflectance Model for Bidirectional Texture Function Synthesis", Proc. the 17th International Conference on Pattern Recognition, Vol.1, pp.80- 83 2004

[5] E. P. F. Lafortune, S. C. Foo, K. E. Torrance and D. P. Greenberg, "Non-linear approximation of reflectance functions," Proc. Siggraph, pp.117-126, Aug. 1997.

[6] G. Muller, G. H. Bendels, R. Klein, "Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artifacts", Proc. the 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, 2005

[7] G. Muller, J. Meseth, M. Sattler, R. Sarlette and R. Klein, "Acquisition, Synthesis and Rendering of Bidirectional Texture Functions", Proc. Eurographics, pp.69-94, 2004

[8] M. Schneider, "Real-Time BTF Rendering", Proc. the 8th Central European Seminar on Computer Graphics, pp. 79-86, 2004

[9] 関根真弘, 山内康晋, "マクロ柄を考慮した双方向依存テクスチャの生成とマッピング", 情報処理学会, グラフィクスと CAD, pp.13-18, 2004

[10] 武田祐樹, フィンクァンファイ ヴィエト, 坂口嘉之, 田中弘美, "フレネル項を考慮した多視点画像の反射光解析に基づく織布の異方性反射モデリング", MIRU2005 画像の認識・理解シンポジウム予稿集, pp.1582-1589, 2005

[11] L. Y. Wei and M. Levoy, "Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization", Proc. Siggraph, pp.479-488, 2000