

反射光解析に基づく薪能における能装束の質感再現

脇田 航¹ 田中 士郎¹ 古川 耕平² 八村 広三郎¹ 田中 弘美¹

概要: 近年、実世界のような多数光源下でフォトリアリスティックなレンダリングを行う方法として、Image Based Lighting (IBL) に関する研究が進められている。しかしながら、IBL は膨大な計算量が必要となるため、近年、計算コストを減らすための研究が盛んに行われているが、動的な光環境についての研究事例は少ない。そこで本研究では、動的な光環境として、薪能における能装束の異方性反射特性の再現を試みる。まず、能装束の異方性反射特性を多方向照明画像解析に基づいて画像ベースでモデル化し、次に、能舞台周りの薪の炎の揺らめきを画像ベースで生成し、動的な環境マップとする。動的な環境マップから直接 IBL の計算を行うことにより、少ない計算コストで薪の炎による動的照明環境下における能装束の異方性反射計算をリアルタイムに実現する。

1. はじめに

近年、デジタル技術による文化財の保存・復元に関する研究が盛んになってきており [1], [2], [3], 我が国においても、文化財にまつわるコトをデジタル技術を用いて多感覚情報で多面的に計測・モデル化・再現するための手法や展示インタフェースの開発、来館者の行動や興味に応じた鑑賞支援等といった、時空間を超えて文化財を五感体験可能なデジタルミュージアム [4] に関する研究が進められている。本研究では、日本文化を代表する伝統芸能である能を対象とし、デジタル技術を用いて薪能 [5] をリアルタイムに再現することを目的とする。薪能は能の一種であり、夏の夕暮れから夜にかけて、舞台周りに薪を焚いて行われる神事・仏事である。舞台周りでゆらめく炎が照明効果となり、能装束は煌びやかに反射する (図 1)。能装束には金襴や刺繍が施されており、非常にきめ細かな立体構造となっている。光が当たったときの反射も複雑であるため、光の入射方向と視線方向によって反射の仕方が異なる異方性反射特性を持つ。

物体表面の異方性反射は、任意の入射方向の入射光に対する任意の視方向への反射光の比率である双方向反射分布関数 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) [6] によって記述される。3DCG 技術を用いて BRDF による照明効果を実現する際、二次元画面上に最終



図 1 薪能 [5]
Fig. 1 Takigi Noh

的にレンダリングされる各ピクセルの三次元空間位置周りに入射する光をすべて考慮すると膨大な計算量が必要となる。近年、実世界のような多数光源下でフォトリアリスティックなレンダリングを行う方法として、カメラで実空間を撮影したパノラマ画像 (環境マップ) を環境照明として反射計算を行う Image Based Lighting (IBL) [7] の研究が進められているが、膨大な BRDF の計算量が問題となる。IBL の計算コストを減らすための方法として、環境マップをサンプリングする方法 [8], [9], 環境マップと BRDF の掛け合わせによる方法 [10], [11], 環境マップから直接反射計算する方法 [12], [13], [14] 等が提案されている。

しかしながら、これらの手法はシーンの環境光は一定であり、炎のように光が変化することはない。また、炎の表現方法は主に物理ベース法 [15] と手続き型テクスチャ [16] による方法が挙げられるが、いずれも生成した炎を光源としたときの光の反射の計算量が問題となる。

そこで本研究では、取り扱いが容易な手続き型テクス

¹ 立命館大学情報理工学部
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan
² 立命館大学映像学部
College of Image Arts and Sciences, Ritsumeikan University, Kita-ku, Kyoto 603-8577, Japan



図 2 能装束
Fig. 2 Noh Costume

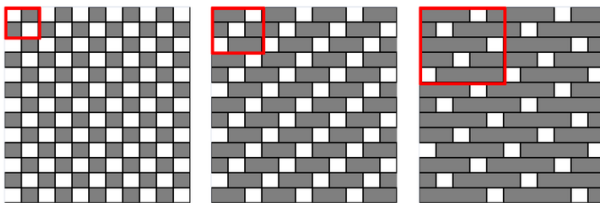


図 3 三原組織
Fig. 3 Weave structure chart

チャを用いて能舞台周りに設置した薪の炎による動的照明環境を環境マップとして扱うことにより、環境マップから直接反射計算する方法と同じ計算で能装束の異方性反射特性をリアルタイムに実現する。

2. 能装束と異方性反射特性

能に用いられる衣装は装束と呼ばれ、能の内容等を表す重要な役割をもっている。女性、鬼女、女神、天女等の役によって使用される装束が異なる。

図 2 に本研究で用いる能装束（赤地金亀甲團扇唐織）を示す。唐織は主に女性役で用いられ、金襴や様々な色の糸で花・葉・枝の文様が織り込まれている。金襴の金糸、基本地の朱色糸はたて糸・よこ糸が規則的に並んでいることが確認でき、文様の絹糸の部分は規則性を持たないが、横糸のみで構成されていることが確認できる。

一般的な織物はたて糸・よこ糸を交差させて作られており、基礎となる織物の組織は平織・綾織・朱子織の三原組織と呼ばれる。図 3 に織物の三原組織（左から平織、綾織、朱子織）を示す。赤枠で囲まれた領域は、組織を表す最小領域であり完全組織と呼ばれる [17]。図 2 の能装束織物は、基本地の織組織は綾織で構成されており、金襴部分は規則的な織り方で構成されていることから、これらは完全組織化が可能である。また、文様部分は朱子織のような横糸のみで構成されていることから、本研究では朱子織の横糸を用いて組織化する。

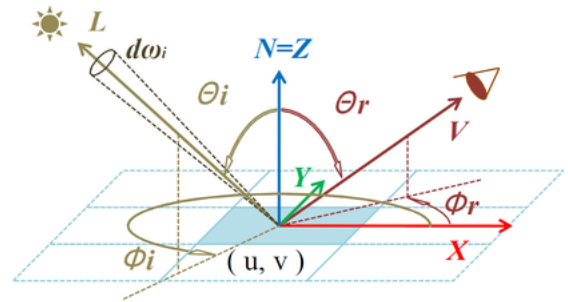


図 4 BTF の幾何関係
Fig. 4 Geometric representation of BTF.

能装束のような金襴を含む織物は織組織が立体構造となっているため、その各点について BRDF を定義しないと異方性反射を忠実に再現することができない。このため我々は、Ashikhmin の BRDF モデル [18] を拡張し、双方向テクスチャ関数 Bidirectional Texture Function (BTF) [19] (図 4) を用いて綾織、朱子織、金襴部分の異方性反射を解析・モデル化し、モデル化した完全組織 BTF テクスチャをもとに能装束の復元を行う。

BTF $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, u, v)$ は球座標で定義され、物体表面上の任意の点 (u, v) において、式 (1) より、入射方向 (θ_i, ϕ_i) からの放射照度 $L_i(\theta_i, \phi_i, u, v)$ に対する視方向 (θ_r, ϕ_r) への放射輝度 $L_r(\theta_r, \phi_r, u, v)$ の比として定義される。

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

ここで、 $L_i(\theta_i, \phi_i, u, v)$ は点 (u, v) において入射方向 $L(\theta_i, \phi_i)$ から入射した放射輝度、 $L_r(\theta_r, \phi_r, u, v)$ は点 (u, v) において視方向 $V(\theta_r, \phi_r)$ へ反射する放射輝度である。また、 N を能装束表面の法線方向、 L と N のなす角 θ_i を入射角、 L を XY 平面に投影したベクトルと X 軸がなす角 ϕ_i を入射方位角、 V と N のなす角 θ_r を視角、 V を XY 平面に投影したベクトルと X 軸がなす角 ϕ_r を視方位角とする。

3. 能装束の異方性反射特性のモデル化

本研究では、全方位型光学異方性反射測定装置 (OGM: Optical Gyro Measuring Machine) を用い、能装束の真上にカメラを固定し、光源位置を変化させ、多重露光による多方向照明観測画像を獲得する。光源の入射方向 $L(\theta_i, \phi_i)$ を、 θ_i が 0 度から 85 度まで 5 度ずつ、 ϕ_i を 0 度から 355 度まで 5 度ずつ変化させ、入射方向の変化に対して 1224 種類の観測画像を獲得する。ただし、能装束は金襴が施されており、反射光のダイナミックレンジが広いいため、各光源位置において、露光時間を 1/4000, 1/500, 1/80, 1/10(sec) の 4 種類で多重露光撮影を行い、HDR(High Dynamic Range)画像を獲得する。このため、観測画像は計 4896 枚となる。

次に、獲得した画像から武田らの手法 [17] を用いて、能装束の織組織の BTF 画像を獲得し、レーザーレンジスキャナによって獲得した能装束の三次元モデル表面にテクス

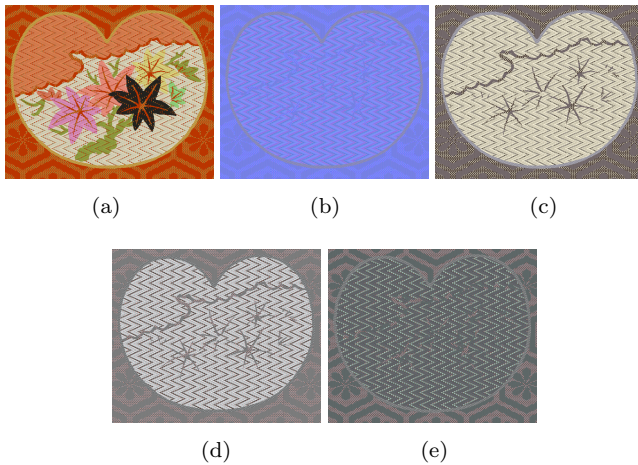


図 5 能装束の BTF テクスチャ
Fig. 5 BTF Textures of Noh Costume

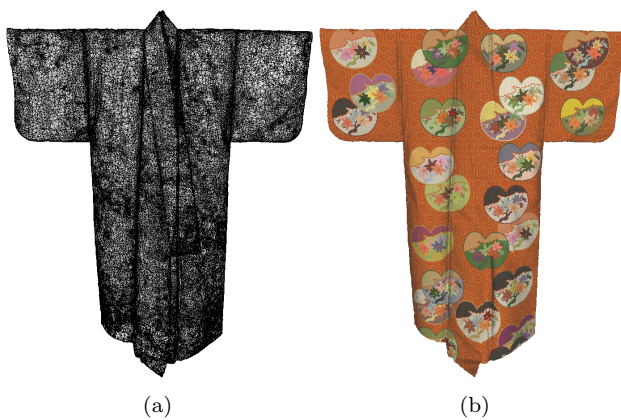


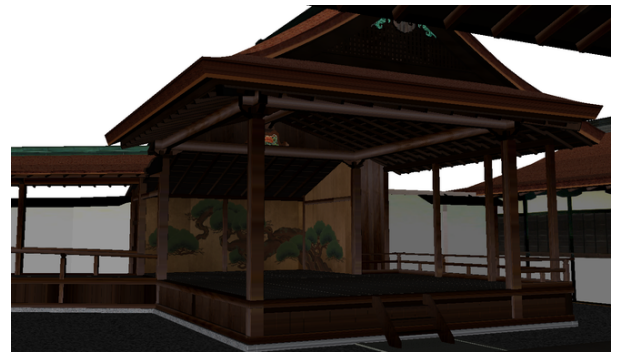
図 6 能装束の三次元モデル
Fig. 6 3D Model of Noh Costume

チャマッピングすることにより、能装束の復元を行う。図 5 に反射光解析に基づく能装束の BTF 画像の一部を示す。図 5(a) は拡散マップで、織物の色そのものを表す。図 5(b) は法線マップで、織物表面の傾きを表す。図 5(c) は鏡面マップで、織物の鏡面反射の強さを表す。図 5(d)(e) は偏差マップで、織物の異方性反射の広がりを表す。

図 6 にこれらのテクスチャを能装束の三次元モデルにマッピングしたものを示す。図 6 は、コニカミノルタ社の非接触 3 次元デジタルサイザ (VIVID910) を用いて計測した形状モデル (三角ポリゴン数 150007) である。

4. 薪能舞台のモデル化

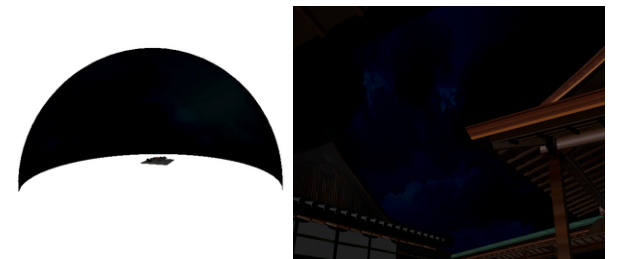
本研究では、日本で現存する最古の国宝能舞台である、西本願寺・北能舞台において、デジタル技術を用いて薪能を再現する。近年、北能舞台で実際に能が演じられることは極めて少ない。また、北能舞台では基本的に昼間に能が行われたと言われている。このことから、夕方から夜にかけて行う薪能を北能舞台で再現するということはデジタル技術ならではのあり、通常では見ることのできない新しい能の表現が期待できる。



(a)



(b)



(c)

図 7 西本願寺・北能舞台の三次元モデル
Fig. 7 3D Model of Noh Stage

図 7 に復元した北能舞台のモデルを示す。本舞台は、現存する資料の寸法をもとに、三次元モデリングソフトウェア (NewTek 社の LightWave3D) を用いて作成した [20]。北能舞台の鏡板の松図は、現状では風雨に晒されほとんど原型を留めていない。図 7(a)(b) に示す鏡板は川面美術研究所により当時の松図が復元されたものをテクスチャマッピングしている。また、薪能を再現するために、舞台周りに薪のオブジェクトを配置し (図 7(b) 参照)、舞台背景の空を表現するために、半球体のオブジェクトに空のパノラマ画像をテクスチャマッピングした (図 7(c) 参照)。パノラマ画像の作成には全天周画像撮影装置 [21] を使い、カメラを水平方向に 30 度間隔で 360 度、垂直方向に 15 度と 45 度自動で傾かせながら多重露光で複数枚撮影し、パノラマ合成ソフトウェア (Easypano 社の Panoweaver7.4) を用いて合成した。空や薪を含む能舞台のポリゴン数は三角ポリゴンで 104740 である。

本研究では、取り扱いが容易な手続き型テクスチャ [16] を用いて炎を表現する。炎の生成には Perlin Fire[22] を用

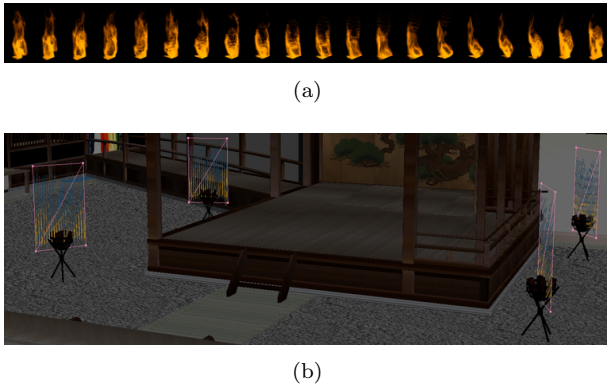


図 8 Perlin Fire による炎のモデル
Fig. 8 Fire Model by Perlin Fire



図 9 アニメの環境マップ
Fig. 9 Animated Ambient Map

い、生成した炎のアニメーション画像（図 8(a) 参照）はそのままテクスチャとして薪のオブジェクト上の平面モデルにマッピングし（図 8(b) 参照）、レンダリング時に各フレーム毎の炎の画像に切り替える。

また、生成した炎のアニメーション画像と能舞台上周りの照明環境を環境マップとして扱うことにより、環境マップから直接反射計算する方法 [14] と同じ計算で環境照明と炎による能装束の光の反射計算を行う。図 9 に本舞台上からの環境マップを示す。炎の画像部分をレンダリング時に切り替えることにより、アニメの環境マップとして IBL の計算を行う。

5. レンダリング

前章までに述べた各モデルに基づきレンダリングを行う。光源は舞台周りの環境および設置した薪の炎を環境マップとしてフラグメント単位で IBL および能装束の異方性反射計算を行う。フラグメント単位のシェーディングを行うにはシェーダ言語によるプログラミングが必要である。シェーダ言語には High Level Shader Language(HLSL), OpenGL Shading Language(GLSL), C for graphics(Cg) 等があるが、本研究では OpenGL と親和性の高い GLSL

を用いた。

最終的にディスプレイに表示される各ピクセルの輝度値は拡散反射色 D 、鏡面反射色 S の足し合わせで決まる。以下にそれぞれについて述べる。

5.1 拡散反射

拡散反射の強さ P_d は、物体の傾き（法線ベクトル） C_n と光源方向 L の内積によって決まる。

$$P_d = C_n \cdot L \quad (2)$$

ここで、 C_n は物体にマッピングされた法線マップの輝度値を三次元空間ベクトルに変換したものである。薪能舞台の場合、 L は舞台周りに設置した 4 つの薪の炎への方向とし、1 フレームにつき 4 回計算して足し合わせたものの平均をとる。

次に、物体の表面にマッピングされた拡散マップの輝度値 C_d と光源の輝度値 C_l の掛け合わせで拡散反射の色 D を決定する。

$$D = P_d C_d C_l \quad (3)$$

ここで、薪を光源とした場合、 C_l は炎のテクスチャ（図 8(a) 参照）の中心部分からの平均輝度値とし、炎との距離の 2 乗に反比例させる。

5.2 鏡面反射

鏡面反射については、能装束は Ashikhmin モデルを BTf へと拡張したものを用い、それ以外は Blinn-Phong モデルを用いた。

Ashikhmin モデルにおいて、鏡面反射の強さ P_s は以下の式で計算される。

$$P_s = \frac{D(\theta_h, \phi_h)}{\cos \theta_i \cos \theta_r}, \quad (4)$$

$$D(\theta_h, \phi_h) = \rho_s \exp(-\tan^2 \theta_h (\frac{\cos^2 \phi_h}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_h}{\sigma_y^2})), \quad (5)$$

ここで、 θ_i は極座標で見たときの水平方向に対する光の入射角度、 θ_r は極座標で見たときの垂直方向に対する視線の角度、 (θ_h, ϕ_h) は極座標で見たときのハーフベクトル H （視線への方向と法線方向を足して正規化したもの）の水平方向および垂直方向の角度、 ρ_s は物体表面にマッピングされた鏡面マップの輝度値、 σ_x と σ_y は物体表面にマッピングされた偏差マップの輝度値の大きさである。

Blinn-Phong モデルの場合、鏡面反射の強さ P_s は以下の式で計算される。

$$P_s = (H \cdot C_n) \rho_s \quad (6)$$

次に、視線方向が物体に跳ね返った先の環境マップ（図 9 参照）の輝度値 C_a との掛け合わせで鏡面反射の色 S を決定する。

$$S = P_s C_a \quad (7)$$

表 1 動作環境

Table 1 Operating Environment

CPU	Intel(R) Core(TM) i7 950@3.07GHz
RAM	24.0GB
ビデオチップ	NVIDIA GeForce GTX 580 × 3

5.3 ミップマップ

本研究のように、能装束を織組織レベルで緻密にモデル化するとテクスチャサイズが非常に大きくなる。テクスチャサイズが大きくなると、レンダリング時にモアレやノイズが発生してしまう問題がある。この問題を防ぐため、本研究では物体と視点からの距離に応じてミップマップを適用し、使用する能装束のテクスチャサイズを動的に切り替える。

使用するグラフィックカードによって OpenGL で扱うことのできるテクスチャの大きさは異なるが、本論文では、一般的に普及している GeForce を対象とする。本論文での動作環境ではテクスチャサイズは 8192×8192 まで扱うことができるため、最大テクスチャサイズを 8000×8000 としている。現状では、能装束の部分のみミップマップを適用し、図 5 の 5 種類のテクスチャの全体の解像度を適宜切り替える。

6. レンダリング結果

前章までに述べた各種モデルおよびレンダリングアルゴリズムに基づき、デジタル薪能のコンテンツの実装を行った。本稿におけるレンダリング結果の動作環境は表 1 の通りである。

図 10 に環境マップによる能舞台のレンダリング結果を示す。図 10(a) は昼間の環境マップによるレンダリング結果、図 10(b) は夜の環境マップおよび舞台周りの薪の炎を光源としたときのレンダリング結果である。

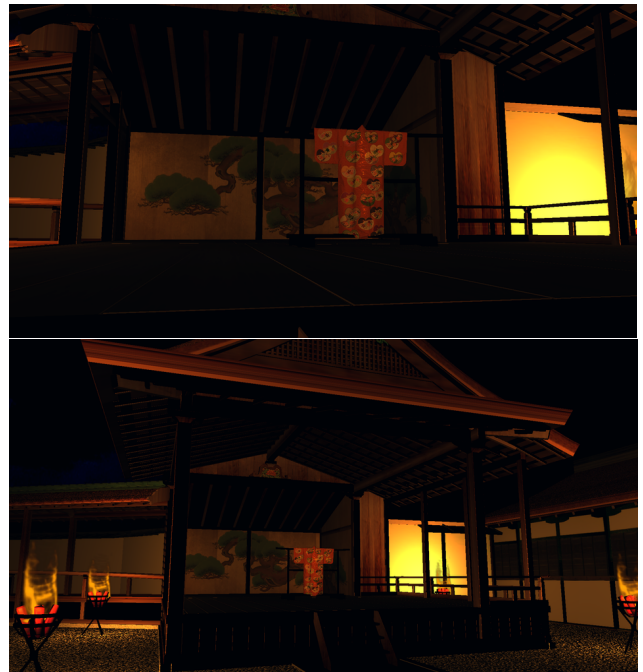
図 11 にミップマップ効果を示す。徐々に能装束に視点を近づけると、糸一本糸一本の織構造が確認でき、綾織、金欄、朱子織部分の傾きの変化によって、それぞれ反射特性が異なることが見て取れる。

7. まとめ

本研究では、デジタル技術を用いて薪能をリアルタイムかつ忠実に再現するために、舞台周りの薪の炎によって照らされる能装束の異方性反射特性を反射光解析に基づきリアルタイムに再現する方法について述べた。現状、光の反射計算を高速化するため、環境マップは IBL 計算時の物体表面との位置関係を固定化して（光は無限遠点上にあるものとして）扱っている。このため、鏡面反射の計算において、物体が動くと光との位置関係がずれる問題がある。また、現状では動的光源下における実物の能装束の反射がどのようなものか検証しておらず、得られたレンダリング結



(a)



(b)

図 10 能舞台のレンダリング結果

Fig. 10 Rendering Results of Noh-stage

果が正しいのか評価できていない。また、さらなるリアリティの追及として、能演者の動きによる人体アニメーションおよび能装束の変形シミュレーションの実現等があげられる。また、様々な舞台、照明、演技、装束、面の実現や、ワキ役や囃子方の配置、音楽の表現等も今後の課題である。

謝辞 本研究は、平成 14-18 年度 立命館大学 21 世紀 COE プログラム「京都アート・エンタテインメント創成研究」、平成 19-23 年度 文部科学省グローバル COE プログラム「日本文化デジタル・ヒューマニティーズ拠点」、平成 21 年度 文部科学省研究開発事業「デジタル・ミュージアム実現のための研究開発に向けた要素技術及びシステムに関する調査検討」、平成 22-24 年度 文部科学省度科学技術試験研究委託事業「デジタル・ミュージアムの展開に向けた実証実験システムの研究開発」の助成を受けたものである。

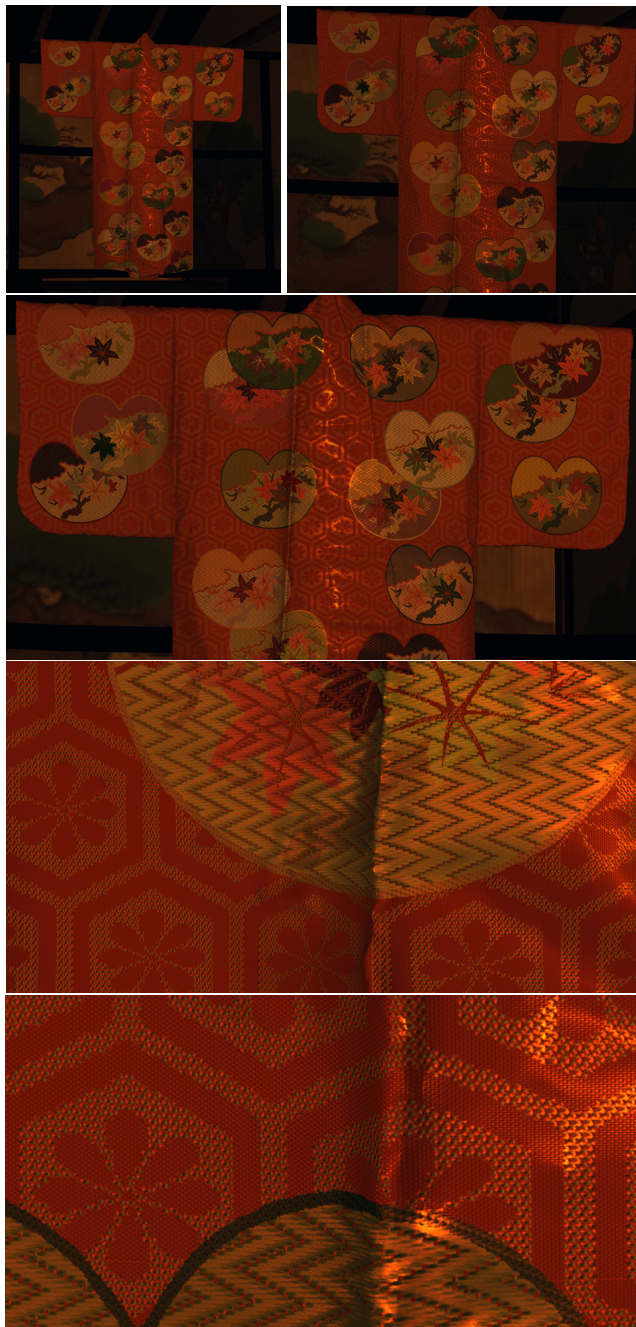


図 11 ミップマップ効果

Fig. 11 Mipmap Effect

参考文献

- [1] Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J. and Fulk, D.: *The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*, ACM SIGGRAPH 2000, pp.131–144(2000).
- [2] Styliani, S., Fotis, L., Kostas, K. and Petros, P.: *Virtual Museums, a Survey and Some Issues for Consideration*, Journal of Cultural Heritage, Vol.10, No.4, pp.520–528(2009).
- [3] Carrozzino, M. and Bergamasco, M.: *Beyond Virtual Museums: Experiencing Immersive Virtual Reality in Real Museums*, Journal of Cultural Heritage, Vol.11, No.4, pp.452–458(2010).
- [4] 廣瀬通孝: デジタルミュージアムプロジェクト, 映像情報

- メディア学会誌, Vol.64, No.6, pp.783–788(2010).
- [5] 能「紅葉狩」, 1987 年 9 月号 広報おおいだ, 入手先 <<http://www.pref.oita.jp/site/archive/200637.html>>
- [6] Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W. and Limperis, T.: *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*, Technical Report Archive and Image Library (1977).
- [7] Debevec, P.: *Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography*, ACM SIGGRAPH '98, pp.189–198 (1998).
- [8] Agarwal, S., Ramamoorthi, R., Belongie, S. and Jensen, H. W.: *Structured Importance Sampling of Environment Maps*, ACM Transactions of Graphics, Vol.22, No.3, pp.605–612 (2003).
- [9] Ostromoukhov, V., Donohue, C. and Jodoin, P.-M.: *Fast Hierarchical Importance Sampling with Blue Noise Properties*, ACM Transactions of Graphics, Vol.23, No.3, pp.488–495 (2004).
- [10] Clarberg, P., Jarosz, W., A.-Möller, T., Jensen, H. W.: *Wavelet Importance Sampling: Efficiently Evaluating Products of Complex Functions*, ACM Transactions of Graphics, Vol.24, No.3, pp.1166–1175 (2005).
- [11] Jarosz, W., Carr, N. A. and Jensen, H. W.: *Importance Sampling Spherical Harmonics*, Computer Graphics Forum, Vol.28, No.2, pp.577–586 (2009).
- [12] Sloan, P.-P., Kautz, J. and Snyder, J.: *Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments*, ACM Transactions of Graphics, Vol.21, No.3, pp.527–536 (2002).
- [13] Ng, R., Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: *All-Frequency Shadows Using Non-linear Wavelet Lighting Approximation*, ACM Transactions of Graphics, Vol.22, No.3, pp.376–381 (2003).
- [14] Krivánek, J. and Colbert, M.: *Real-time Shading with Filtered Importance Sampling*, Computer Graphics Forum, Vol.27, No.4, pp.1147–1154 (2008).
- [15] Nguyen, D. Q., Fedkiw, R., Jensen, H. W.: *Physically Based Modeling and Animation of Fire*, ACM Transactions of Graphics, Vol.21, No.3, pp.721–728 (2002).
- [16] “Light Probe Image Gallery”, 入手先 <<http://ict.debevec.org/~debevec/Probes/>>
- [17] 武田祐樹, 坂口嘉之, 田中弘美: 少数視点画像の反射光解析に基づくシルクライク織物の異方性反射レンダリング, 芸術科学会論文誌, Vol.7, No.4, pp.132–144 (2008).
- [18] Ashikhmin, M., Premoze, S. and Shirley, P.: *A Microfacet-based BRDF Generator*, ACM SIGGRAPH '00, pp.65–74 (2000).
- [19] Dana, K. J., Ginneken, B. V. Nayar, S. K. and Koenderink, J. J.: *Reflectance and Texture of Real-world Surfaces*, ACM Transactions of Graphics, Vol.18, No.1, pp.1–34 (1999).
- [20] Furukawa, K., Choi, W., Hachimura, K. and Araki, K.: *CG Restoration of a Historical Noh Stage and Its Use for Edutainment*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.4270, pp.358–367 (2006).
- [21] 武田祐樹, 原 次良, 脇田 航, 坂口嘉之, 田中弘美: ポータブル光学異方性反射測定装置と全天周画像撮影装置の開発, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol.2012-CVIM-181, No.18, pp.1–5 (2012).
- [22] Fuller, A. R., Krishnan, H., Mahrous, K., Hamann, B. and Joy, K. I.: *Real-time Procedural Volumetric Fire*, 2007 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D'07), pp.175–180 (2007).