

Microfacet BSDF モデルを用いた織布の CG 表現*

―カーテンアニメーションカタログの制作―

飛谷謙介 ** 石田適志 † 野村周平 † 長田典子 ** †

Modeling and Rendering of Woven Cloth Using Microfacet BSDF -Production of curtain catalog animations-

Kensuke TOBITANI, Atsushi ISHIDA, Shuhei NOMURA and Noriko NAGATA

The need for rendering woven fabrics arises frequently in computer graphics. Woven fabrics have a specific appearance, sheen, and transparency. A BRDF (bidirectional reflectance distribution function)/BTDF(bidirectional transmittance distribution function) model is well known as the basic technology for expressing the appearance of woven fabric. In order to represent the transparency of woven fabric, a BSDF (bidirectional scattering distribution function) model is required in addition to the BRDF/BTDF model. In this paper, we propose a BSDF model using the microfacet BTDF model(GGX model), and perform comparison experiments. As a result, we confirmed the effectiveness of our method with objects of quality of generated CG image, rendering time, and parameter adjustment. Our goal is to produce a catalog of curtain animations that can express various kinds of Woven Cloths under arbitrary light conditions.

Key words: computer graphics, BTDF, lace curtain, global illumination

1. はじめに

コンピュータグラフィクス技術の発達に伴い、多様な高精細表現 が可能になっている、映画やゲームのみならず、アパレル・ファッ ション分野におけるネットショップビジネスや、ものづくりにおけ るビジュアルシミュレーション工程においても、素材の質感をリア ルに表現する高質感表現技術に対する期待がますます高まっている.

質感再現性を高める一つの方法として, 物体面の正確な反射特 性を表現する双方向反射分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) 1) の利用が挙げられる. これまでに様々な BRDF の提案が行われており、また、そのための計測手法やレン ダリング手法が開発されている.一方で,布や液体など透過特性 を持つ素材については、双方向透過分布関数 (BTDF: Bidirectional Transmittance Distribution Function) による表現が有効である. し かしながら、どのようなBTDFがどのような素材に適しているかと いった BTDF モデルに関する議論はほとんど行われてこなかった. 筆者らはこれまでに、織布の質感を表現するBTDFとして、HGF 関数を用いたモデルの提案を行ってきた2)3).しかしこのモデルは, いわゆる現象ベースモデル(Phenomenologically-based model) で あり、内部散乱など複雑な光学現象を考慮したものではない.

そこで本研究では、物理ベースモデル(Physically-based model) である GGX モデルに基づく BTDF を導入し、布素材の内部散乱ま で考慮した質感表現を可能とする. まず布素材のBTDFを計測し、 これまでに提案されたいくつかの BTDF モデルに関して、計測値 に対するフィッティング精度を求め、比較検討を行う. 次にモデル に基づき作成した アニ メーションの視覚的な比較によって、モデ ルの有効性を定量的, 定性的の両面から示す. 最終的には, カーテ ンをアニメーション化し多様な布素材を様々な照明条件下で動かし たときの質感をリアルに表現するアニメーションカタログの制作を 目指している.

2. 先行研究

質感表現を行うための近似モデルは, 現象ベースモデルと物理 ベースモデルに大別される、現象ベースモデルは、直感的な操作に より質感表現を行うのに適しているが、その半面、複雑な光の挙動 の表現には向いていない. 現象ベースの BRDF モデルには、Phong モデル⁴, Ward モデル⁵, Ashukhmin-Shirly モデル⁶ などがある. 物理ベースモデル は光学現象を正確に表現できるが、その分、計算 負荷が高いという問題点がある、代表的な物理ベース BRDF モデ ルに Torrance-Sparrow モデル⁷⁾ や Cook-Torrance モデル⁸⁾ などが 挙げられる.

一方、BTDF に関しては、Stam らの提案した人肌を表現する現 象ベースの異方性反射/透過モデルがある⁹⁾. また能装束における 織布の正透過特性に着目した表面幾何モデルが武田らによって提案 されている $^{10)11)}$. さらに近年では物理ベースの BTDF モデルも提 案されはじめており,Microfacet をベースとした GGX モデル ¹²⁾ や, BRDF と BTDF を統一して扱った Dual Microfacet モデル ¹³⁾ などがある.

しかしながら、織布の場合は、糸による内部散乱に加えて、糸の 隙間を通る直接透過光も質感に大きく影響を与えていると考えられ る. このような布素材の織り構造と散乱を併せて考慮した物理ベー ス BRDF/BTDF モデルはこれまで提案されていない. そこで本研究 では織布の構造を考慮し、複雑な光学現象を再現可能な Microfacet BSDF(Bidirectional Scattering Distribution Function) モデルを提案

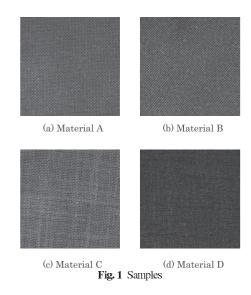
3. 織布の透過特性の計測

本章では、織布の透過特性計測実験の概要、および素材による透 過特性の違いについて述べる. また, 計測結果から織布の質感を再 現する際に重要と考えられる点について考察する.

^{*} 原稿受付 平成 25 年 5 月 16 日

^{**} 関西学院大学 感性価値創造研究センター(兵庫県三田市学園 2-1)

[†] 関西学院大学 理工学部(兵庫県三田市学園 2-1)

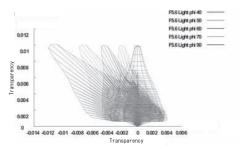


3.1 計測環境

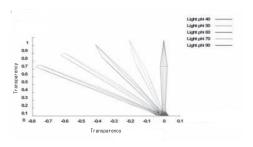
計測には、BRDF 測定装置 OGM-3(OGM:Optical Gyro Measuring Machine) を用いる。本研究で使用する OGM-3 は BRDF だけでなく BTDF も計測できるよう改造されたものである。計測は暗室で行い、光源には自然光に近いメタルハライド光源を使用する。また、露光時間や F 値を調整することでダイナミックレンジを変化させた計測データを得ることができる。計測には白色の織布で、それぞれ縦糸と横糸の太さや間隔などが異なる 4 つの代表的な布素材(図 1)を用い、図 2 に定義した座標系において。布素材の横糸方向を X 軸,縦糸方向を Y 軸,布素材の法線を Z 軸に合わせ計測を行う。図 2 中 V は視点ベクトル、L は光源ベクトル、N は試料面の法線,H は V と L のハーフベクトルをそれぞれ表す。計測点数は、カメラの仰角 ϕ_C が 10° ~90° の 40 ステップ、カメラの方位角 θ_C は 0° と 180° の 2 ステップ、ライトの仰角 ϕ_L は 130° ~ 180° の 5 ステップ、ライトの方位角 θ_L は 150° ~ 150° ~ 150° ~ 150° ~ 150° ~ 150° 0 150° ~ 150° 0 150° 0 150° ~ 150° 0 150° 0

3.2 計測結果

計測した BTDF の一部 (素材 A, θ_L =180°) を図 3 に示す.織布 の正透過方向の BTDF 値とそれ以外の BTDF 値に大きく差がみられたため,図 3(a) に露光時間 32msec,F 値 5.6 での計測結果を,図 3(b) に露光時間 1msec,F 値 16.0 での計測結果をそれぞれ示す.図 3(a) から,光の入射方向による透過傾向の変化が観測され,異方性があることが確認できた.また,ダイナミックレンジを変化させ



(a) F-Number: 5.6, Exposure Time: 32msec



(b) F-Number:16.0 Exposure Time:1msec

Fig. 3 Measured BTDF

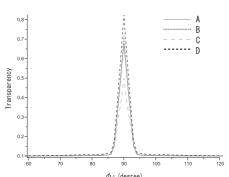


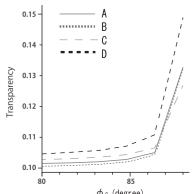
Fig. 4 Measured regular transmission BTDF

た計測結果 (図 3(b)) から、正透過方向の透過光が最も大きく、そこから角度がずれるにつれ透過光が急激に減少することが確認できる. 以上より織布の透過光は図 3(a) に示すような拡散透過成分と図 3(b) に示すような指向性透過成分から構成されていると考えられる.

次に,織布の光の透過特性に大きく影響を与えていると考えられる指向性透過成分に注目し,素材ごとの指向性透過成分の計測結果(θ_C =0°,180°, ϕ_L =40°)を図 $\mathbf 4$ に示す.図 $\mathbf 4$ から素材 $\mathbf C$ と $\mathbf D$ では大きく透過特性が違うことが観測される.実際,図 $\mathbf 1$ (c) と 図 $\mathbf 1$ (d) を比較すると透過率に大きな差があることから,計測結果が妥当であると判断できる.また,図 $\mathbf 5$ に示す BTDF の裾の部分(ϕ_C =80°から $\mathbf 87$ °)においても素材 $\mathbf A$, $\mathbf C$, $\mathbf D$ 間で透過特性の違いが確認された.

3.3 考察

素材の違いにより、計測グラフにおけるピークおよび裾の部分において、素材間で計測値の違いが確認された.このことから、透過光のピーク部分に加え、ピークから数度ずれた裾の部分を正確に近似することが織布の質感を再現する上で重要であると考えられる.



 $\phi_{\,\text{\tiny C}}$ (degree) $Fig.\,5\,$ Tails of the measured regular transmission BTDF

Table 1 Rank of Fitting Accuracy of BRDF Models

| 1 | Cook-Torrance |
|---|------------------|
| 2 | Ashikhmin-Shirly |
| 3 | Ward |
| 4 | Phong |

4. BTDF モデルの比較検討

前章で述べたように、素材によって透過特性は異なるため、質感 の再現性を高めるには素材に応じた近似モデルを検討する必要があ る. そこで本章では、織布の BTDF の表現に適している近似モデ ルを比較,検討する.

4.1 BRDF モデルの比較,検討

Ngan らは金属, プラスチック, 布等の 100 種類の素材の BRDF を計測し、それぞれの計測値に対して複数のBRDF モデルのフィッ ティング精度を算出した ¹⁴⁾¹⁵⁾. 比較に用いた BRDF モデルは現象 ベースモデルである、Phong モデル、Ashikhmin-Shirley モデルお よび Ward モデル,物理ベースモデルである Cook-Torrance モデル 等で,各素材に対してどの BRDF モデルのフィッティング精度が 高いかを比較、検討している.表1に Ngan らの比較結果を示す.

物理ベースモデルであり、物理的な光の挙動を最も正確に表現し ている Cook-Torrance モデルが一番フィッティング精度が高く,現 象ベースの単純なモデルである Phong モデルが最もフィッティン グ精度が低い結果となった.しかし、表1に示した結果は全ての素 材に対するフィッティング精度から総合的に判断した順位であり, 素材によっては大きく順位が入れ替わることも報告されている. そ のため、織布の質感の再現性を高めるためには、織布の BTDF に対 して Ngan らと同様の検討を行う必要がある.

4.2 BTDF モデルの比較,検討

近似モデルの比較には前節で述べたPhong モデル,Ward モデル, Ashikhmin-Shirly モデル, Cook-Torrance モデルについて BTDF 用 のパラメータに変更したものに加え,これまでに我々が提案した Woven Cloth HGF モデル、および Microfacet BTDF モデルである GGX モデルの計 6 つの近似モデルを用いる. Woven Cloth HGF モ デルについては次節に詳しく述べる.

4.2.1 Woven Cloth HGF モデル

織布の透過特性は、任意の入射方向の入射光に対する任意の視点 方向への透過光の比率を値とする BTDF で記述できる. BTDF は

 Table 2 Comparison Between The BTDF Models

| | Model | (10^{-4}) |
|---|------------------|-------------|
| 1 | GGX | 258 |
| 2 | HGF | 333 |
| 3 | Ward | 422 |
| 4 | Cook-Torrance | 431 |
| 5 | Ashikhmin-Shirly | 432 |
| 6 | Phong | 604 |

以下の式で与えられる.

$$BTDF(\theta_t, \phi_t, \theta_i, \phi_i) = \frac{L_t(\theta_t, \phi_t)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i}$$
(1)

ただし、 $L_i(\theta_i, \phi_i)$ は光源方向から入射した放射照度、 $L_t(\theta_t, \phi_t)$ は視点方向へ透過される放射輝度である.

3.2 節で述べたように織布の透過成分は拡散透過成分と指向性透 過成分から構成されている. Woven Cloth HGF モデルは、それぞ れの成分を Henyey-Greenstein 関数を用いて表現した織布の質感表 現のための物理ベース BTDF モデルである. Henyey-Greenstein 関 数は銀河系間のごみの散乱を実測値から説明するために用いられる 関数で、Woven Cloth HGF モデルでは、光が糸を透過する際の光の 挙動の説明に応用した. Henyey-Greenstein 関数は以下の式で表さ れる.

$$ph(\theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi (1 + g^2 - 2g cos\theta)^{1.5}} \tag{2}$$

ただし $g \in [-1,1]$ は、散乱の位相の形を決める重み係数である. g が正の値のときは前方散乱, 負の値では後方散乱になる.

したがって、視点方向に透過される放射輝度を以下の式で表現す ることが可能である.

$$L_{out}(\theta_t) = L_D + k_d L_{in} exp(-\tau) p h_{diff}(\theta_t) \rho + k_s I_{in} exp(-\tau) p h_{spec}(\theta_t) \rho$$
(3)

ただし、 $L_{out}(\theta_t)$ は視点方向に透過する放射輝度、 L_{in} は放射 照度, L_D は糸に当たらずに透過する放射輝度(直接透過光), k_d は拡散透過係数, $exp(-\tau)$ は吸収係数, $ph_{diff}(\theta_t)$ は拡散透過光 の Henyey-Greenstein 関数, ρ は糸の密度, k_s は指向性透過係数, $ph_{spec}(\theta_t)$ は指向性透過光の Henyey-Greenstein 関数である.

4.2.2 BTDF モデルと計測データとの比較

3章で計測した織布のBTDFに対する、複数の近似モデルのフィッ ティング精度をそれぞれ算出した. 比較に用いる BTDF は、素材 Aにおけるライトの方位角が0°, ライトの仰角が180°, カメラ の方位角が 0°と 180°, カメラの仰角が 10°から 90°の 40ス テップで重複点1点を除いた計79点における計測データである. また、近似モデルのパラメータは、上記の計測点 79 点に対して Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) を用いた反復法によって最適化し た. 計測値と各モデルとの誤差を最小二乗法によって算出した結果 を**表 2**に示す. 表 2 から, BRDF モデルである Phong モデル, Ward モデル, Ashikhmin-Shirly モデルおよび Cook-Torrance モデルの近 似精度が悪いことがわかる. 従って、織布の透過特性を表現する場 合, BRDF モデルの転用は難しく BTDF 専用のモデルを用いる必 要があると考えられる.

次に,織布の質感を再現する上で重要な指向性透過成分におけ る各モデルのフィッティング精度に注目する.透過率のピーク付

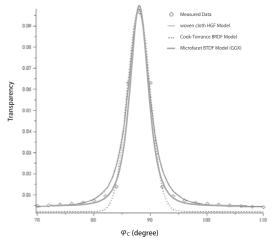


Fig. 6 Comparison between the measured BTDF and the modeled BTDF $(\theta_C=0^\circ~,180^\circ~,\theta_L=0^\circ~,\phi_L=90^\circ~)$

近 21 点に、3 章で計測した BTDF と Woven Cloth HGF モデル、Cook-Torrance モデルおよび GGX モデルの近似結果を図6 に示す。図6 より、全てのモデルにおいて、透過光のピークである指向性透過成分の BTDF 値が計測値とよく一致していることがわかる。しかし、ピークから数度ずれた裾の部分である拡散透過成分の BTDF 値は、Cook-Torrance モデルや Woven Cloth HGF モデルで正確に近似できていないのに対して、GGX モデルでは計測値とほぼ一致する結果が得られた。

4.3 Woven Cloth Microfacet BSDF モデル

前節の結果から、織布の BTDF としては GGX モデルが最も適していることが示された。そこで本研究では、GGX モデルを基にして、織布の質感表現のための近似モデルである Woven Cloth Microfacet BSDF モデルを提案する。式 (4) に Woven Cloth Microfacet BSDF モデル式を示す。

$$L_{out} = k_a L_{direct} +$$

$$1/2(k_t L_t f_{GGX} exp(-\tau)\rho) +$$

$$1/2(k_t L_p f_{GGX} exp(-\tau)\rho)$$
(4)

ただし, L_{out} は視点方向へ透過する放射輝度, k_a は環境係数, L_{direct} は糸に当たらずに透過する放射輝度(直接透過光), L_t は 糸の内部で屈折し透過する放射輝度(拡散透過光), L_p は糸の内部で屈折せず透過する放射輝度(指向性透過光), k_t は直接透過係数, $exp(-\tau)$ は吸収係数, ρ は糸の密度である。 f_{GGX} は以下の様に表すことができる。

$$f_{GGX} = \frac{\cos\theta_{lh}\cos\theta_{vh}}{\cos\theta_{nl}\cos\theta_{vn}} \frac{n_2^2(1-F)GD_{GGX}}{(n_1\cos\theta_{lh} + n_2\cos\theta_{vh})^2}$$
 (5)

ただし、 n_1 、 n_2 はそれぞれの透過する媒質の屈折率を表す.幾何減衰率G は、反射光が物体表面で減衰する現象であるセルフシャドウィングやセルフマスキングの割合を表し、式 (6) のように表現される.

$$G = min(1, \frac{2cos\theta_{nh}cos\theta_{nv}}{cos\theta_{vh}}, \frac{2cos\theta_{nh}cos\theta_{nl}}{cos\theta_{vh}})$$
 (6)

フレネル関数 F は波動光学における光の鏡面反射される割合を

Table 3 PC Specification

| OS | Microsoft Windows 7 Professional 64-bit Edition | |
|-------------------------------------|---|--|
| CPU | Intel(R)Core(TM)i7 processor 2.93GHz | |
| Memory | 4.00 GB RAM | |
| GPU NVIDIA GeForce GTX 480: 1536 MB | | |

表し、式(7)のように表現される.

$$F = \frac{(-(\frac{n_2}{n_1})^2 cos\theta_{nh} + \sqrt{(\frac{n_2}{n_1})^2 - sin\theta_{nh}})^2}{((\frac{n_2}{n_1})^2 cos\theta_{nh} + \sqrt{(\frac{n_2}{n_1})^2 - sin\theta_{nh}})^2} + \frac{(cos\theta_{nh} - \sqrt{(\frac{n_2}{n_1})^2 - sin\theta_{nh}})^2}{(cos\theta_{nh} + \sqrt{(\frac{n_2}{n_1})^2 - sin\theta_{nh}})^2}$$
(7)

分布関数 D_{GGX} は物体表面の微小面が任意の正面を向いている割合を表し、式 (8) のように表現される.

$$D_{GGX} = \frac{r^2}{\pi cos\theta_{hl}^4 (r^2 + tan\theta_{hl}^4)^2} \tag{8}$$

ただし、式中rは微小面の粗さを表すパラメータである。

5. Woven Cloth Microfacet BSDF モデルを用いた CG 画像 の生成と比較

本章では、提案した Woven Cloth Microfacet BSDF モデルの有効性の検証するために、レンダリング画像を視覚的に比較する。レンダリングは Autodesk MAYA 上で行い、クロスシミュレーション (nCloth) によってカーテンの CG アニメーションを作成した。レンダリングの際、拡散光源を窓の外側に配置し、カーテンを動かすための風を、窓面に対して垂直方向に発生させた。レンダリングに使用した PC の詳細を表 3 に示す。

5.1 直接光のみを考慮したレンダリング画像による比較

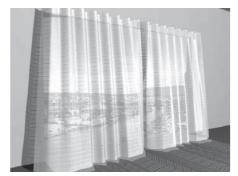
まず、直接光のみを考慮した照明条件下でレンダリング画像の比較を行う. 比較する画像は計測した BTDF を用いてレンダリングしたもの、Woven Cloth HGF モデルを適用したもの、および Woven Cloth Microfacet BSDF モデルを適用したものを用いる. なお、反射光成分は透過光の変化のみに注目するため、単純なランバート反射に基づくよう設定した.

図 7 に OGM-3 による計測した BTDF を用いてレンダリングした画像を示す.ここで用いる BTDF は露光時間 8msec,F値 1.0 で計測されたものである.レンダリングには 1 フレームあたり約 10 秒要した.

また、図8に Woven Cloth HGF モデルによるレンダリング結果を示す. レンダリングには1フレームあたり約30秒要した.

最後に、図9に Woven Cloth Microfacet BSDF モデルによるレンダリング結果を示す. レンダリングには1フレーム約5秒要した. 図7, 図8, 図9それぞれ(a) に静止している状態,(b) に動いている状態のレンダリング画像を示す.

図7,8,9から、全てのモデルにおいて、カーテンのドレープによって引き起こされる特有の透過特性を表現できていることがわかる。しかし、図8は図7に比べて透過度が強くなっているのに対し、図9と図7は似た傾向を示していることからわかるように、透過光が強い部分では、各モデルによって違いが確認された。この違いは、Woven Cloth Microfacet BSDFが、前述したBTDFのピーク



(a) Rendering image in a state of rest



(b) Rendering image in a state of motion

Fig. 7 Rendering CG images using measured BTDF

から数度ずれた裾の部分の光の挙動を正確に近似していることに起 因していると考えられる.

5.2 GI環境下におけるレンダリングの比較

高品質なカーテンアニメーションを制作するためには, 直接光 のみではなく, 間接光の挙動をシミュレートしたグローバルイルミ ネーション(GI:Global Illumination)を考慮する必要がある. 本節で は、フォトンマッピング法 ¹⁶⁾ を用いることによって、GI 環境下に おける CG レンダリング画像を生成し、それぞれを比較する. 図 10 は Woven Cloth HGF モデルを用いたレンダリング画像であり、図 11 は Woven Cloth Microfacet BSDF モデルを用いたレンダリング 画像である.

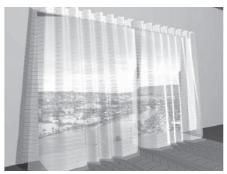
図 10 および図 11 から、Woven Cloth Microfacet BSDF モデルを 用いた方が、レースカーテンが持つ柔らかさをより再現できている ように感じられ、現実に近い質感を持ったレースカーテンを表現で きていると思われる.

5.3 考察

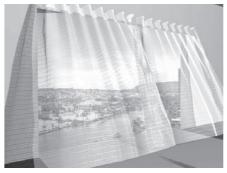
レンダリング画像の視覚的な比較により, 直接光のみの照明環 境下および GI 環境下のどちらにおいても Woven Cloth Microfacet BSDF モデルの有効性を示す結果が得られた. また, Woven Cloth HGF モデルでは、1つの画像を生成するために6つのパラメータ を制御する必要があるのに対して、Woven Cloth Microfacet BSDF モデルでは2つのパラメータを調整することで画像生成が可能であ る. 以上より, 生成画像の品質, パラメータ調整の容易さ, レンダ リング時の計算コストそれぞれにおいて提案手法が有効であること がわかった.

6. まとめ

本研究において、我々は BTDF モデルの比較を行い、Microfacet BTDF モデルである GGX モデルが最も正確に織布の BTDF を近 似することを示した.次に、このGGXモデルをベースに、織布に



(a) Rendering image in a state of rest



(b) Rendering image in a state of motion

Fig. 8 Rendering CG images based on Woven Cloth HGF Model

おける光の内部散乱を考慮した新たな BSDF モデルである Woven Cloth Microfacet BSDF モデルを提案した. 従来の近似モデルとの 比較実験において、生成画像の品質、パラメータ調整の容易さ、レ ンダリング時の計算コストそれぞれにおいて有効性を示す結果が得 られた

今後の課題としては、拡散透過成分に対しモデル化を行うこと で,より高品質な CG 画像の生成を行うと同時に,実物のカーテン と生成した CG アニメーションとの比較や主観評価実験等, 定量的 かつ影の質感も含めた総合的な CG 画像の評価方法についても検討 を進めていく. また, サンプル数を増やすことにより, 様々な色, 模様、織り方の織布の再現を試みることで、提案手法の汎用性につ いても検討する予定である.

考文献

- 1) Blinn, J.F., "Models of light reflection for computer synthesized pictures". ACM SIGGRAPH 1977, 19(10), 542, (1977).
- 2) Uno H, Mizushuma Y, Nagata N, Sakaguchi Y, 'Lace curtain: measurement of BTDF and rendering of Woven Cloth -Production of a catalog of curtain animations-". ACM SIGGRAPH 2008: Talks, Measurement and Textures, Full Conference DVD-ROM, 0960-abstract.pdf.
- 3) Mizushima Y, Nomura S, Umeizumi G, Nagata N, Sakaguchi Y, Lace Curtain: Modeling and Rendering of Woven Structures using BRDF/BTDF -Production of a catalog of curtain animations -". ACM SIGGRAPH 2009: posters, Modeling, Full Conference DVD-ROM, 733mizushima.pdf
- 4) Bui Y. Phong, "Illumination for computer generaterd pictures". Commun. ACM, 18(6):311, June (1975).
- 5) Gregory J. Ward. "Measuring and modeling anisotropic reflection". In SIGGRAPH '92: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 265, New York, NY, USA, (1992) ACN Press.
- Ashikhmin M., Shirley P.S., "An anisotropic phong BRDF model". Journal of Graphics Tools 5, 2(2000), 25.
- 7) K.E.Torrance and E.M.Sparrow. "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces". Journal of the Optical Society of America, 57(9):1105, September (1967).
- 8) R.L.Cook and K.E.Torrance. "A reflectance model for computer graphics". ACM Trans. Graph., 1(1):7, January (1982).



(a) Rendering image in a state of rest

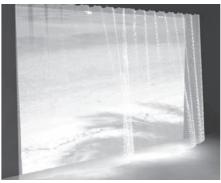


(b) Rendering image in a state of motion

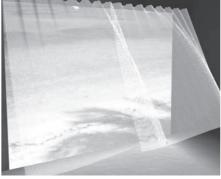
Fig. 9 Rendering CG images based on Woven Cloth microfacet BSDF

- 9) Stam, J., "An illumination model for a skin layer bounded by rough surfaces". Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Render-
- ing Techniques, 39, (2001).
 10) Y. Matsuda, Y. Takeda, H. Tanaka, "A new method taking advance of the twofold transparency component for measuring the BRDF and BTDF of woven cloth". IPSJ SIG Computers and the Humanities Symposium 2006, (2006). 11) Y. Matsuda, Y. Takeda, H. Tanaka, "Digital archive for the Noh cos-
- tume". *Practical Motion image processing Workshop*, (2006).

 12) Walter, B. and Marschner, S.R. and Li, H. and Torrance, K.E., "Micro-
- facet models for refraction through rough surfaces", Rendering Tech-
- niques(Proc. EG Symposium on Rendering), pages 195, (2007).
 13) Qiang, D. Jiaping, E. Yiming, L. John, S. Enhua. W, Baining. G, "The Dual-microfacet Model for Capturing Thin Transparent Slabs", Pacific Graphics 2009, volume 28, (2009).
- 14) Ngan, A. and Durand, F. and Matusik, W., "Experimental analysis of BRDF models", *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering volume* 2, (2005).
- 15) Ngan, A. and Durand, F. and Matusik, W., "Experimental validation of analytical brdf models", ACM SIGGRAPH 2004 *Sketches*.
 16) Henrik W. Jensen, "Global illumination using photon maps". *Proceed-*
- ings of the eurographics workshop on Rendering techniques '96, pages 21, (1996).



(a) Rendering image in a state of rest

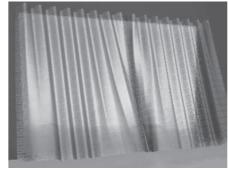


(b) Rendering image in a state of motion

Fig. 10 Rendering CG images based on Woven Cloth HGF model with GI



(a) Rendering image in a state of rest



(b) Rendering image in a state of motion

Fig. 11 Rendering CG images based on Woven Cloth microfacet BSDF model with GI