

異方性透過散乱特性の計測と織布の質感表現

-カーテンのアニメーションカタログ制作-

鵜野 仁史¹ 長田 典子¹ 坂口 嘉之²

関西学院大学理工学部¹ デジタルファッション株式会社²

E-mail: {hitoshi_uno, nagata}@ksc.kwansei.ac.jp sakaguti@dressingsim.com

Measurement of BSSTDF and rendering of woven cloth

- Production of animation catalog of curtain -

Hitoshi Uno¹ Noriko Nagata¹ Yoshiyuki Sakaguchi²

Kwansei Gakuin University¹ Digital Fashion Ltd.²

E-mail: {hitoshi_uno, nagata}@ksc.kwansei.ac.jp sakaguti@dressingsim.com

1 概要

コンピュータグラフィクス(CG)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.しかし,現状の3DCG制作過程においては,精細な質感表現へ近づけるのはクリエイタの手作業であり,大きな手間や時間を要している.近年CGレンダリングにおいて,素材の光沢や質感を表現する異方性反射分布関数(BRDF:Bidirectional Reflectance Distribution Function)が提案され,作業にかかる時間は大きく短縮された[1][2][3][4][5].さらにBRDFを一般化し表面下散乱を考慮した異方性散乱面反射分布関数(BSSRDF:Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function)も提案されている[6][7].これにより人肌や大理石,植物の葉といった素材表面の質感を忠実に再現することができる.しかし,透過特性を持つ素材の質感を表現することはできない.

本研究では,布素材に固有の光沢や質感を忠実に再現する技術の1つとして,織布の異方性透過散乱特性に着目し,異方性透過散乱分布関数(BSSTDF:Bidirectional Subsurface Scattering Transmittance Distribution Function)を計測し,分布関数に基づき3DCG表現を行う.またBSSTDFの近似モデルを提案し,近似結果と計測値の比較を行い,その妥当性を示す.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を制作することを目指している.

2 関連研究

CGは映画,テレビ,CM,Webといったコンテンツ制作の様々な場面で用いられている.とりわけWebの普及によって様々な商品をデジタル化し,データベース化する傾向が強くなっている.一例としてカーテンのカタログが挙げられる.カーテンは色,柄,素材など膨大な種類があり,そのカタログは,重くかさばり制作コストがかかるという問題がある.またこうしたインテリアは,実際に配置された時に,まわりの色や光との相互作用や揺れ動く際の光の変化によって喚起されるイメージが重要であるにもかかわらず,カタログの写真や布の切れ端から受ける静的なイメージとの間に大きな乖離が存在することが問題である.これを解決するためには,布素材を様々な照明条件下で動かしたときの質感を忠実に表現しなければならない.

布の質感表現で用いられる基本技術は異方性反射分布関数(BRDF)であり,Cook-Torranceの物理ベースモデルが代表的である[8].他にもAshikhminらは布の微視的幾何構造(Microfacet geometry)を扱ってBRDFを実現し,サテンやベルベットをモデル化している[1].一方,透過に関してはAdabalaらが工業製品の織り方を元に電子化されたWIF(Weave Information File)を応用し様々な織構造に適応できる透過モデルを提案している[4]が,異方性については扱われていない.武田らは能装束に着目し,織布の正透過特性に着目した表面幾何モデルを提案している[2][3]が,このモデルでも糸を通る光の透過散乱は扱われていない.カーテンやレースなどの布は,布独特の柔らかな

光の透け方を示す．これを表現するためには織構造による透過特性に加えて糸を通る光の散乱特性を考慮できるモデルが不可欠である．

そこで本研究では，2つの異なる織布を対象にし，計測によって透過散乱特性を獲得する．また計測結果を元に織布の透過散乱モデルを提案する．

3 BSSTDF の計測

布は素材ごとにその透過散乱特性も異なる．そのため，BSSTDF 計測には光の入射方向と視点方向それぞれを変化させたときの透過散乱特性を獲得する必要がある．

3.1 計測環境

計測に用いる BRDF 測定装置 OGM-3 (OGM: Optical Gauging Mechanism) を図 1 に示す．これは，カメラ固定で，ライト 2 軸，サンプル 2 軸で動作する．4 軸同時に動作するので高速に位置決めができる．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．



図 1 OGM-3 の外観

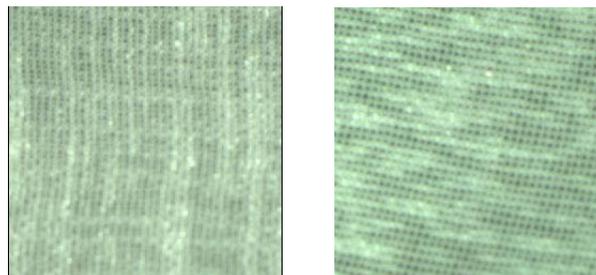
3.2 計測条件

計測には図 2 に示す 2つの素材を使用する．どちらの素材も平織りで，素材 A は糸の太さが一定で，素材 B は糸の太さが場所によって変化する．この 2つの素材を選んだ理由は，素材 A は糸の太さが一定であることに對して，素材 B は糸の太さが均一ではないので，対象素材の透過散乱特性の違いを観察しやすいためである．

2つの素材を図 3 に示す観測点数において確認する．カメラの仰角 ϕ_C は $10^\circ \sim 90^\circ$ の 40 ステップ，カメラの方位角 θ_C は 0° の 1 ステップ，ライトの仰角 ϕ_L は $40^\circ \sim 90^\circ$ の 4 ステップ，ライトの方位角 θ_L は $0^\circ \sim 330^\circ$ の 12 ステップの計 1920 点である．

3.3 計測結果

計測結果を以下の 3つの観点から示す．1 点目は素材の異方性，2 点目は透過散乱光のダイナミックレンジ，3 点目は 2つの素材の透過散乱特性の違いである．



素材 A 素材 B
図 2 計測で用いた 2種類のカートン素材

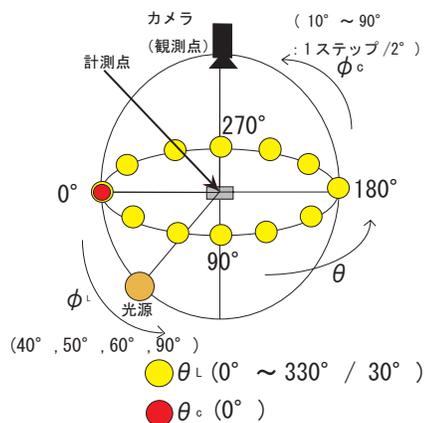


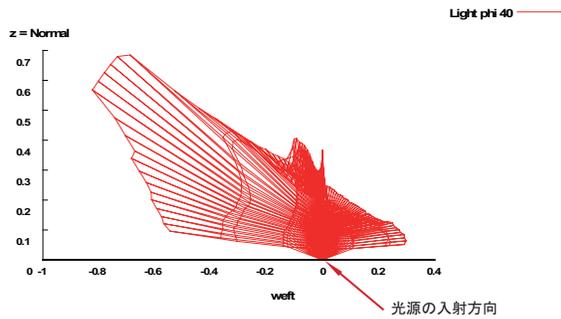
図 3 観測点と光源の概観

3.3.1 素材の異方性

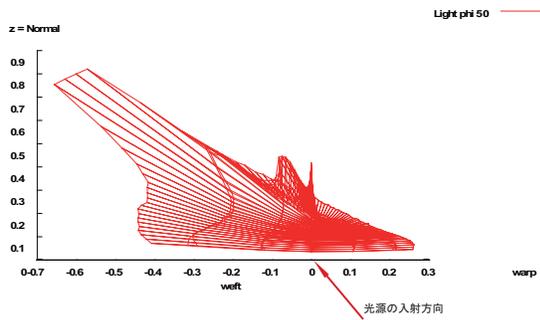
図 4 に素材の異方性に着目した計測結果を示す．図 4(a),(b),(c) のいずれのグラフも正透過方向の軸に対して，非対称の BSSTDF となっている．特に，光源の入射方向より浅い観測点 (グラフ左下側) においてデータの広がりが見られ，透過光が散乱しやすいことが分かる．また，素材 B は横糸の太さが均一でない．これらのことから，糸の隙間を通過する光量と糸の内部を通過する光量が，観測点の角度によって変化することが分かる．したがって，素材 B の透過散乱特性は異方性を持つと言える．

3.3.2 透過散乱光のダイナミックレンジ

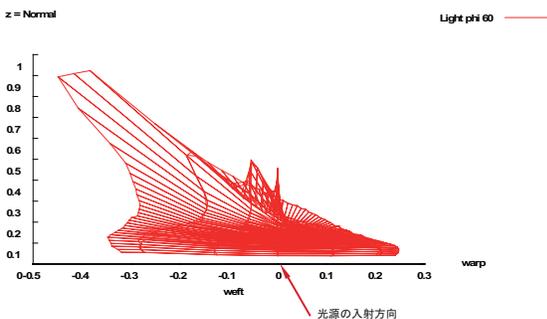
図 5 に透過散乱光のダイナミックレンジを変化させた計測結果を示す．計測結果から観測点と計測点と光源の 3 点が一直線方向になるとき (正透過方向) の透過率が高い．つまり，観測点の方向と光源方向の間に $\theta_C = \theta_L \pm \pi$ かつ $\phi_C = \phi_L \pm \pi$ の関係を持つ場合である．さらに，正透過方向から観測点の角度がずれると透過率が大きく減少することが分かる．図 5 を比較することによって透過光には，拡散透過成分 (散乱光) と指向性透過成分 (正透過方向による透過光) が含まれると考えられる．



(a) $\phi_L = 40^\circ$



(b) $\phi_L = 50^\circ$

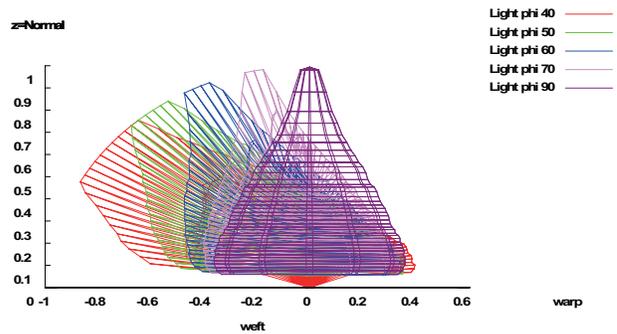


(c) $\phi_L = 60^\circ$

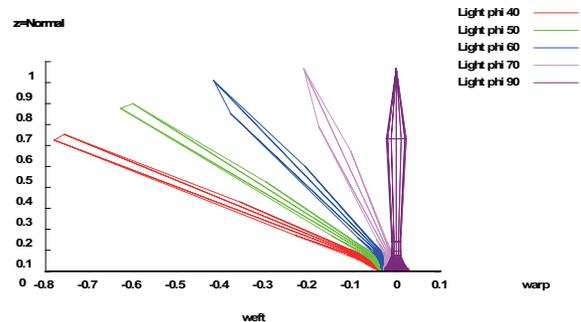
図4 計測結果1 (異方性の確認, 素材B, $\theta_C = 0^\circ$)

3.3.3 2つの素材の透過散乱特性の違い

図6に同条件における2つの素材の透過特性の計測結果を示す。計測結果から2つの素材の透過散乱特性が異なることが分かる。図6(b)は、光源の入射角が小さくなるほど、光源が正透過方向からずれたときのグラフの広がりが大きくなることから、光が散乱しやすいことが観察される。さらに、素材Bに着目し、 $\phi_L = 40^\circ$ の時の透過率の変化を図7に示す。図中の矢印で示すように、光源が正透過方向以外の場所でも透過率が凸になる部分が数点見られるため、異方性の透過散乱特性を持つことが確認された。また、図6のそれぞれのグラフの $s \phi_C = \pi/2$ の場合に注目すると、



(a) F値 5.6 露光時間 32msec



(b) F値 16 露光時間 1msec

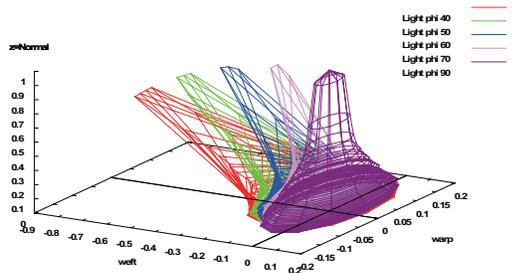
図5 計測結果2 (透過散乱光のダイナミックレンジ, 素材B, $\theta_C = 0^\circ$)

どちらの素材も透過率に対称性を持つ。

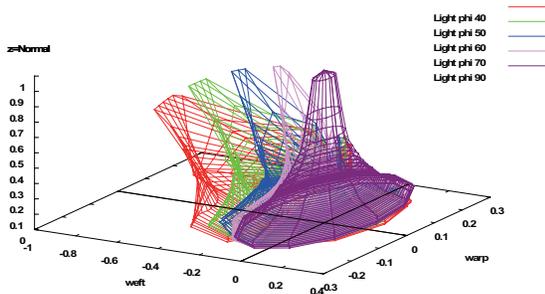
3.4 考察

異なる素材の持つBSSTDFを計測し、透過散乱特性の違いを明らかにすることができた。

まず素材Bの縦糸と横糸に着目した計測結果から、素材Bの透過散乱特性に異方性があることが確認された。次に計測ごとに光量の調節を行った計測結果から、光源方向と観測点の方向が計測点を中心に一直線上にあるときの光の透過率が最も大きいことが観察された。また、正透過方向における光の強さが他の部分に比べて非常に大きく、図5に見られるように白潰れ(グラフで平らになっている部分)が生じた。そこで光量を調節しダイナミックレンジを48[dB]に広げることによって、透過率の低い部分も適切に計測することが出来た。さらに透過光が拡散透過成分(散乱光)と指向性透過成分からなることが観察され、拡散透過成分と指向性透過成分の大きさに応じた透過率の変化を獲得することができた。2つの素材の透過散乱特性の違いに着目した計測結果では、素材の違いによる透過散乱特性の違いが観察された。素材Bは、横糸の太さが均一でないことから、角度によって透過率が変化することが分かる。特に、いくつかの観測点方向で透過率のグラフが凸になることから、素材Bの糸そのも



(a) 素材 A



(b) 素材 B

図 6 計測結果 3 (異なる素材による透過特性の違い, $\theta_C = 0^\circ$)

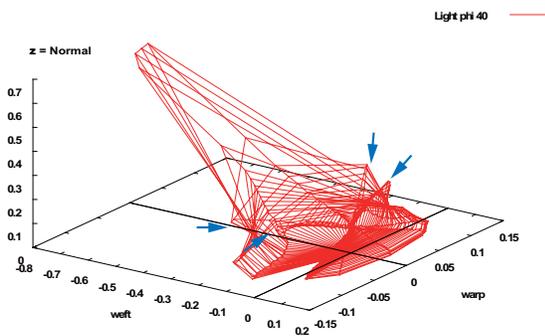


図 7 素材 B の透過率 ($\theta_C = 0^\circ$, $\phi_L = 40^\circ$)

この素材が特定の方向に散乱しやすい傾向があると推定される。

4 アニメーションの生成

BSSTDF の実装には 3DCG アプリケーション Maya[9] のプラグインを使用する。開発環境は Visual Studio .NET 2003 である。計測したデータをレンダリングに用いるプラグインを開発する。今回計測に使用した素材 B を用いて、カーテンをレンダリングした 2 つの結果を図 8 に示す。図中では、光源が窓の面に対して垂直方向にあり、異なる角度で光がカーテンを通過しているため、カーテンの場所によって透過率の変化が見られ、その影に一樣でない濃淡ができていていることが分

かる。そのため、カーテンに対して光の入射角と視点方向の角度がそれぞれ異なるとき、透過率が変化することが確認できる。特に、窓の面に対してカーテンの面が平行である部分の透過率は、著しく高いことが視覚的にも確認することができ、計測で得られた正透過方向の透過率が高くなる結果と一致することが分かる。このことからカーテンの透過散乱特性を忠実に再現していることが確認された。

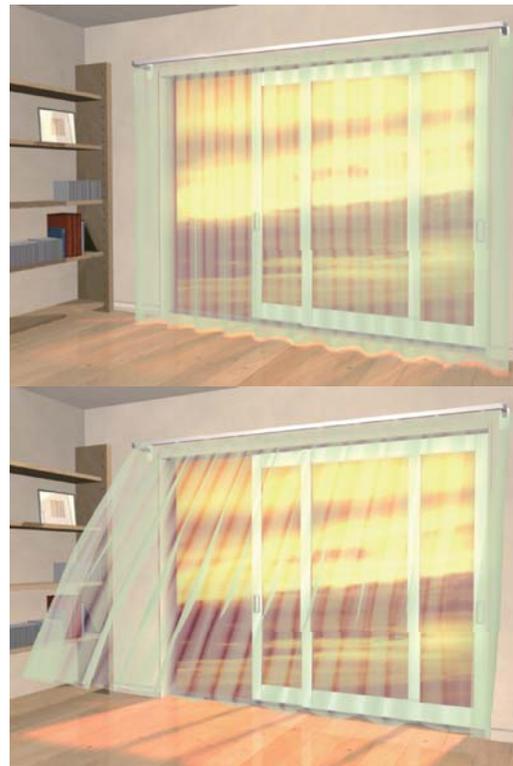


図 8 BSSTDF を用いたカーテンのレンダリング結果 (素材 B)

5 BSSTDF モデルの提案

人肌や布、植物のような光を透過する物質では、その内部における表面下散乱を考慮しなくてはならない。こうした物体の透過散乱特性は、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とする BSSTDF で記述できる。

BSSTDF は以下の式で与えられる。

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

ただし、 $L_i(\theta_i, \phi_i)$ は光源ベクトル方向から入射した放射輝度、 $L_t(\theta_t, \phi_t)$ は視点ベクトルの方向に透過される放射輝度である。

ここで、図 9 のように、糸を透過する光は糸の内部で散乱し透過する。図 5 の計測結果から、透過光に

拡散透過成分（散乱光）と指向性透過成分（正透過方向による透過光）が見られる．以上を踏まえ，新たな布の透過散乱モデルを提案する．このモデルは，拡散透過成分と指向性透過成分から構成し，それぞれの成分を Henyey-Greenstein 関数 [10] で表現する．Henyey-Greenstein 関数は銀河系間のごみの散乱を実測値から説明した散乱モデルであり，これを糸の散乱モデルに適用した．この Henyey-Greenstein 関数は以下の式で表される．

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

ただし $g \in [-1, 1]$ は，ひずみ係数である． g が正の値のときは前方散乱を，負の値では後方散乱になる．

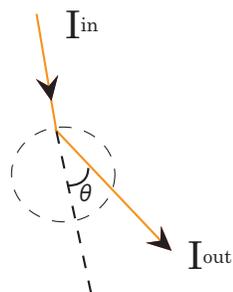


図9 光が糸を通過する様子

したがって，視点方向に透過される光量を以下の式で提案する．

$$I_{out}(\theta_t) = k_d I_{in} \exp(-\tau) ph_{diff}(\theta_t) \rho + k_s I_{in} (1 - \exp(-\tau)) ph_{spec}(\theta_t) \rho \quad (3)$$

ただし， $I_{out}(\theta_t)$ は視点方向に出る光量， k_d は拡散透過係数， I_{in} は入射した光量， $\exp(-\tau)$ は吸収係数， $ph_{diff}(\theta_t)$ は拡散透過光の Henyey-Greenstein function， 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 function である．

素材 A の計測値と提案したモデルを比較したものを図 10 に示す．提案モデルは素材 A 同様，縦糸，横糸の太さは均一であるとする．図 10(a) のグラフは入射光に対して前方 $0 \sim 180^\circ$ の透過率を常用対数で表したものである．図 10(b) のグラフは入射光に対して前方 $0 \sim 180^\circ$ の透過率を極座標に置き換えたものである．提案したモデルと計測値を比較してみると， 90° 付近の入射光の方向に近い指向性透過成分の光が多い部分では急激に透過率が高くなり，その他の散乱光が多い部分では低い透過率になっており，計測値のグラフと一致していることが分かる．

図 10 に示すように，このモデルで出力したグラフと計測値から得られたグラフとが一致することから本手法が有効であると考えることができる．

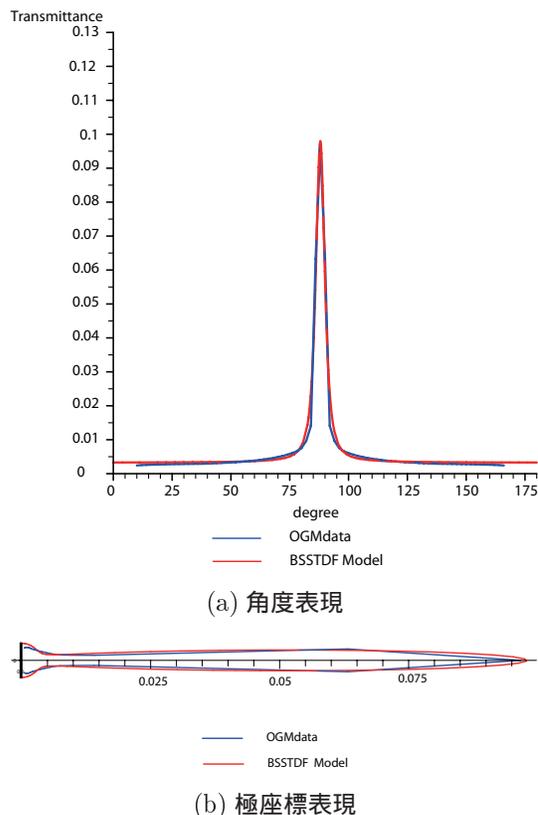


図10 計測値と BSSTDF モデルとの透過率の比較

6 まとめ

本論文では，織布の透過散乱特性に着目し，BSSTDF の計測を行った．また，透過光の拡散透過成分と指向性透過成分から成る織布の透過散乱モデルを提案した．計測結果とモデルを比較することによって本手法の妥当性を確認した．

今後は，まずモデルに基づく素材のレンダリングを行い，本モデルの有効性を視覚的に示す予定である．また今回提案したモデルでは，糸の太さが均一でないものや，あや織り (Twill weave)，朱子織 (Satin weave) のような複雑な織構造を考慮していないため，さらに微視的幾何構造を取り入れたモデルを提案する必要がある．様々な織構造を持った布の透過散乱特性とともに，色・柄のモデル化も行い，カーテンのアニメーションカタログ制作を目標として研究を進める．

参考文献

- [1] Michael Ashikhmin, Simon Premoze, Pete Shirley.: "A Microfacet-based BRDF Generator", SIGGRAPH (2000).
- [2] 武田 祐樹, 松田 悠, 田中 弘美.: "能衣装のデジタルアーカイブングに向けて", 動画像処理実用化ワークショップ (2006).
- [3] 武田 祐樹, 松田 悠, 田中 弘美.: "画像解析に基づく二重透過を利用した織布の透過および反射の抽出", 人文科学とコンピュータシンポジウム (2006).
- [4] Neeharika Adabala, Nadia Magnenat-Thalmann, Guangzheng Fei: "Visualization of woven cloth", EGRW '03: Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, Eurographics Association, pp. 178-

185 (2003).

- [5] 宮崎 大輔, 柴田 卓司, 池内克史.: “Wavelet-Texture 法: Daubechies ウェーブレットと反射モデルと円偏光板による BRDF 圧縮”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp. 269–276 (2006).
- [6] Henrik Wann Jensen, Stephen R. Marschner, Marc Levoy and Pat Hanrahan.: “A Practical Model for Subsurface Light Transport”, SIGGRAPH (2001).
- [7] Pat Hanrahan, Wolfgang Krueger.: “Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering”, SIGGRAPH '93: Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, NY, USA, ACM Press, pp. 165–174 (1993).
- [8] R. L. Cook and K. E. Torrance: “A reflectance model for computer graphics”, ACM Trans. Graph., 1, 1, pp. 7–24 (1982).
- [9] Autodesk Products.: “Maya6.5 Complete”, <http://www.autodesk.co.jp/maya> (2005).
- [10] L. G. Henyey, J. L. Greenstein: “Diffuse radiation in the Galaxy”, The Astrophysical Journal, pp. 70–84 (1).