

## 顔料特性を考慮した表面下散乱モデルによる紙本のCG表現

相井 孝仁          廣瀬 翼          岡田 至弘  
龍谷大学大学院 理工学研究科

近年、デジタルアーカイブの進展にともない貴重書をデジタルデータで閲覧することが可能になってきている。しかし、顔料の見えの変化は十分に表現できていなかった。そこで我々はこれまで、貴重書の彩色に用いられる顔料の粒子の大きさによる見えの変化の表現を表面下散乱モデルを用いて試みた。本報告では、紙面形状の変形(回転やページめくりなど)に伴う反射光の表現方法を提案し貴重書の再現を行う。

### Representation of the paper-book by the subsurface scattering model based on the pigment property

Takahito Soui          Yoku Hirose          Yoshihiro Okada  
Graduate School of Science and Technology  
Ryukoku University

In order to preserve books and paintings, a considerable number of studies have been made on digital archives for the last few years. Many picture books are digitized precisely, however, it is difficult to represent the visibility change of pigment when picture books are rotated or their pages are turned. To solve this problem, we had reported a representation method of the visibility change which was caused by the particle size of pigment. In this study, we reports a representation method of the visibility change when picture books are rotated or their pages are turned.

#### 1 はじめに

近年、コンピュータグラフィックス(CG)の発展に伴い貴重書を高精細に記録・再現するためのデジタルアーカイブが進展している。そのため、これまで劣化の恐れから一般に展示・公開されていなかった書物を、デジタルデータで閲覧することが可能になってきている。そのうえ、貴重書を撮影した画像を公開するのではなく、実際に本を見ているかのような疑似体験を可能とするブラウジングインターフェイス [1] による公開が行われている。このブラウジングインターフェイスでは、本を3Dオブジェクトとして表現し、ページ画像をテクスチャマップ

ングすることで、仮想空間において本を再現している。また3Dオブジェクトであるため、オブジェクトを回転、ページをめくるなどの動作を再現できる。しかし、オブジェクトにマッピングするページ画像は固定環境で撮影されているため、回転やページめくりにもなう、顔料の見えの変化を表現できないという問題がある。この問題を解決する方法として、Physical-Based Rendering(PBR)を用いて見えを表現することが考えられるが、これまで提案されていたPBRの手法では、粒子の大きさによって色が変化するという特性を考慮していなかった。

そのため我々は、まず顔料による色彩を表現するために、表面下散乱モデルをベースに顔料

(岩絵具)の粒子の大きさ(粒度分布)を考慮した反射特性のモデルを提案し、奈良絵本が持つ鮮やかな色彩表現を試みた[2]。本報告では、このモデルを用いて紙面形状の変形にともなう見えの表現を行う。リアルタイム処理を目指すため、紙面形状の変形には分割数の異なるバネモデルを用い、輝度計算においてはグーロー・シェーディングを用いることで計算コストの削減を試みる。

以下は本報告の構成である。2章では奈良絵本と顔料特性について述べ、3章では粒度分布を考慮した反射モデルを述べ、4章で紙面形状の変形手法と輝度計算について述べ、5章で本報告のまとめと課題を述べる。

## 2 顔料特性

### 2.1 岩絵具の背景知識

着色に用いられる色材のうち、水や油に溶解しないものを顔料と呼び、代表的なものとして岩絵具が挙げられる。岩絵具は、様々な鉱石や貴石等を砕いて出来た粉末状の絵具であるため、粉末を定着させるために、膠(ニカワ)を定着剤として併用する。図1のように粉末の目の細かさは番号で分別され、数字が大きくなるほど粒子が細かくなり最も細かいものを白(びやく)とよぶ。

また岩絵具には天然岩絵具と人工岩絵具がある。天然岩絵具は、藍銅鉱、孔雀石、赤珊瑚等の天然の原材料から作られる。中には「焼く」事で色合いを変えられる色が存在する。一方、人工岩絵具には新岩絵具と合成岩絵具があり、ともに天然岩絵具の資源枯渇や値段の高価さのために代替品として用いられている。新岩絵具は珪酸質を含む鉱物と発色性の金属酸化物を高温で溶かし温度差によって様々な発色させた人工岩石を砕いて製造したものである。そのため、天然にはない様々な色を作ることが可能である。合成岩絵具は天然の水晶・方解石を粉碎し対光性のある染料で化学的に染め付けたものである。

これらの岩絵具には以下に示す2つの特性が

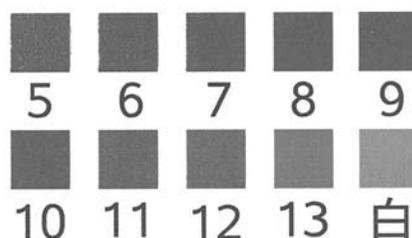


図 1: 岩絵具 群青(5~白)

ある。以後、岩絵具の特性を顔料特性と呼ぶ。顔料特性を利用することで、同じ鉱物でも色調を調節することができる。

**特性 1** 物体の表面粗さが変化

**特性 2** 粒径が大きいきには暗い色になり、小さいときには明るい色(無彩色)に近づく

### 2.2 顔料特性の測定

先に述べた顔料特性は、人間の主観的評価であり、実験的に得られた結果ではない。そこで岩絵具の番号ごとに粒度分布と反射光強度を測定した。

#### 2.2.1 番号ごとの粒度分布の測定

本報告では、番号ごとの粒径を平均化したものを粒度分布とする。これを求めるために、顕微鏡法で粒径を測定した。

顕微鏡法とは、顕微鏡で得られた画像から粒子の大きさを測定する方法で、粒子の投影面積と同じ面積を持つ円の直径(円相当径)に変換することで粒径を求める。そして、粒径を平均化したものを粒度分布  $\sigma_p$  とする( $\sigma_p$  が大きいほど粒径が大きい)。測定結果を表 1 に示す。

#### 2.2.2 反射光強度の測定

今回の実験では、岩絵具の群青を用いてサンプルを作製した。サンプルの作製方法は、発泡スチロールに両面テープを貼り付け、そのテー

表 1: 顔料の番号と粒度分布

番号	7	8	9	10	11	12	13	14
粒度分布 ( $\mu\text{m}$ )	100	70	50	30	15	10	7	5

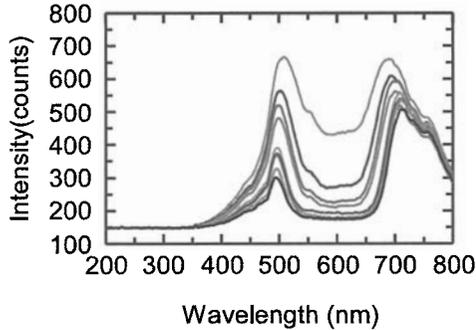


図 2: 群青 (下から 6~14 番) の反射光強度

プの上に各顔料を一様に敷き詰めた。変角分光強度測定装置 (ゴニオフォトメーター) を用いて反射光強度の測定を行った。

岩絵具の群青の結果を図 2 に示す。この結果から、粒径が小さいほど明るく、粒径が大きいほど暗く見えることが確認できた。

番号ごとの粒度分布と反射光強度の測定から、粒径が変化することによって対象物体表面の見え方に対する特性が確認できた。

### 2.3 岩絵具による彩色例

岩絵具で彩色された貴重書の例として奈良絵本 (図 3) が挙げられる。奈良絵本とは、室町中期から江戸前期までの間に作られた明るい彩色の素朴な作風を特色とする奈良絵入りの写本のことである。現在のところ、約 400 編の作品が現存しており、「浦島太郎」や「一寸法師」、「竹取物語」など、今日まで読み継がれている作品もある。しかし、作者はほとんど不明である。

奈良絵本は、おおよそ横本・縦本・大型縦本の三つに分けられ、その造本も様々である。そ

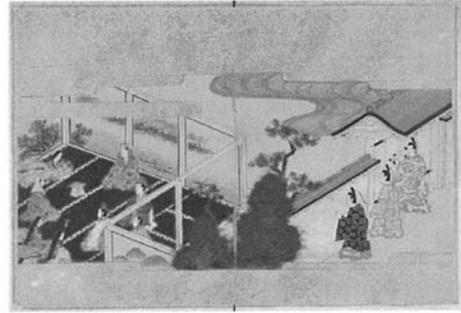


図 3: 奈良絵本 竹取物語

の一ページ、ときに見開き二ページの絵は泥絵具などを用いた奈良絵風のものと、細密華麗な作風のものがあり、ともに天地に「すやり霞」と呼ばれる横に長く棚引く霞をつけた定形の構図を持つ。いずれも朱、緑など鮮やかな色彩が目立ち、その朱や緑などの鮮やかな色に、岩絵具を用いている。

## 3 顔料特性を考慮した表面下散乱モデル

従来の表面下散乱モデルを拡張することで、2.1 節で述べた 2 つの顔料特性を考慮したモデルを提案した。

### 3.1 表面下散乱モデル

物体表面を正確に表現するためには表面上での反射のみではなく、物体内部を通過した光が物体内部で散乱し、再び物体表面から光が通過する現象 (表面下散乱) を考慮する必要がある (図 4)。この表面下散乱を考慮した光の輝度  $L_o(x_o, \omega_o)$  は式 (1) で表される。

$$L_o(x_o, \omega_o) = \int_A \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L_i(x_i, \omega_i) (\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_i) d\omega_i dA(x_i) \quad (1)$$

ここで  $A$  は物体表面の面積、 $\Omega$  はサンプル点  $x_i$  における半球上に分布した方向、 $S$  は双方向散乱面反射率分布関数 (BSSRDF: Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution

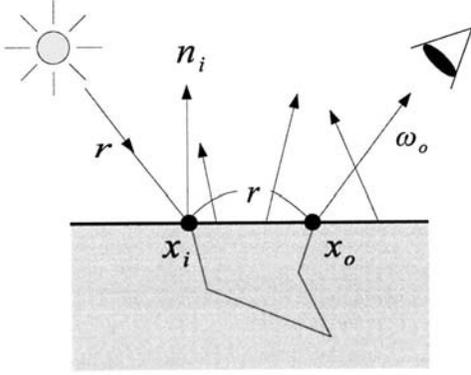


図 4: BSSRDF モデル

Function),  $L_i(x_i, \vec{\omega}_i)$  はサンプル点  $x_i$  における  $\vec{\omega}_i$  方向からの入射輝度,  $\vec{n}_i$  はサンプル点  $x_i$  における法線であり  $dA(x_i)$  はサンプル点  $x_i$  における微小面積である. この反射モデルにおいて, 表面形状はなめらかであると仮定している. そこで Craig らは, 物体内部での表面下散乱および表面粗さを考慮した拡散近似による BSSRDF モデルを提案した [3](式 (2) 参照). 式 (1) の  $S$  をこの  $S_d$  に置換し, 積分計算を行うことによって光の輝度を求めている.

$$S_d(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} \rho_{dt}(x_i, \vec{\omega}_i) R_d(\|x_i - x_o\|) \rho_{dt}(x_i, \vec{\omega}_o) \quad (2)$$

ここで  $\rho_{dt}$  は式 (3) で表され,  $f_r$  は Torrance-Sparrow の双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Filter) である.

$$\rho_{dt}(x, \vec{\omega}_o) = 1.0 - \int_{2\pi} f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i \quad (3)$$

また, 近似された拡散反射率  $R_d$  は次式で表される.

$$R_d(\|x_i - x_o\|) = \frac{\alpha'}{4\pi} \left[ z_r (1 + \sigma_{tr} d_r) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_r}}{d_r^3} \right] + \frac{\alpha'}{4\pi} \left[ z_v (1 + \sigma_{tr} d_v) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_v}}{d_v^3} \right] \quad (4)$$

式 (4) で用いられている変数は以下の式で計算される.

$$\sigma'_t = \sigma_a + \sigma'_s$$

$$\alpha' = \frac{\sigma'_s}{\sigma'_t}$$

$$\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a\sigma'_t}$$

$$D = \frac{1}{3\sigma'_t}$$

$$F_{dr} = -\frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta$$

$$A = \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}}$$

$$z_r = \frac{1}{\sigma'_t}$$

$$z_v = z_r + 4AD$$

$$d_r = \sqrt{r^2 + z_r^2}$$

$$d_v = \sqrt{r^2 + z_v^2}$$

ここで,  $\sigma_a$  は半透明材質の光の吸収係数,  $\sigma'_s$  は縮小散乱係数であり, 材質特有のパラメータとして与えられる.

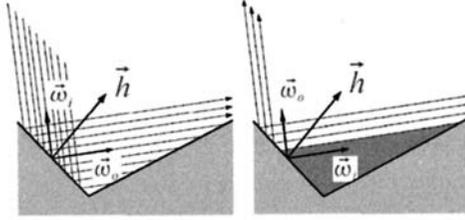
## 3.2 顔料特性を考慮したモデル

### 3.2.1 特性 1 の表現手法

特性 1 である表面の微細な凹凸の変化は, Torrance-Sparrow モデルにおける BRDF を用いる (式 (5)). 式 (5) 中, 表面粗さを表現している Beckmann 関数の粗さパラメータに顔料の粒度分布を利用することで, 表面の粗さを表現できる.

$$f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \frac{D(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) G(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) F(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o)}{4(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})(\vec{\omega}_o \cdot \vec{n})} \quad (5)$$

ここで  $D$  はマイクロファセット分布関数 (Beckmann 関数),  $G$  は幾何学的減衰係数で  $F$  はフレネル反射率である. マイクロファセットは微細な凹凸を構成する微小な面ひとつひとつのことである.



(a) 反射光が遮断 (b) 入射光が遮断

図 5: マイクロファセットによる光の遮断

平面の微細な凹凸形状がひとつひとつのマイクロファセットで構成されていると考える場合、1つのマイクロファセットに入射する光の一部は、表面に到達する前、あるいは反射した後に、隣のマイクロファセットによって遮断される。この遮断によって、鏡面反射がわずかに暗くなる。この効果は幾何学的減衰係数によって表すことができる。

図 5(a) のように左のマイクロファセットで反射した光が右のマイクロファセットで遮断されるとき、視点に達する光の割合  $G_1$  (入射光を 1 とする) は次式のように表される。

$$G_1 = \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_o)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}} \quad (6)$$

また、図 5(b) のようにマイクロファセットに到達する前に光が遮断される場合、光の割合  $G_2$  は次式のようになる。

$$G_2 = \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}} \quad (7)$$

ただし、 $\vec{h}$  は入射方向  $\vec{\omega}_i$  と反射方向  $\vec{\omega}_o$  のハーフベクトルである。このようにマイクロファセットで反射する光に関して、光が全く遮断されない (視点に到達する光の割合が 1)、反射光の一部が遮断される、入射光の一部が遮断されるという 3通りの場合が考えられる。これらをすべて表すために、視点に到達する光の最小割合として幾何学的減衰係数は式 (8) のように表される。

$$\begin{aligned} G(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) &= \min\{1, G_1, G_2\} \\ &= \min\left\{1, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_o)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

また、鏡面反射光強度は光の入射角によって変化し、入射角が浅いほど鏡面反射光強度は強まり、全反射に近づいていく。この現象を表すフレネル反射  $F$  は次式のようになる。

$$F = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left( 1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) + 1)^2} \right) \quad (9)$$

$$c = \omega_i \cdot \vec{h}$$

$$g = \sqrt{\eta^2 + c^2 - 1}$$

$\eta$  は材質の屈折率である。

$D$  はマイクロファセット分布関数であり、微細面が面の法線に対してどの程度ズレて分布しているかを記述する関数である。 $S_{rough}$  が小さいほど滑らかになる。ここで顔料による表面の粗さを表すために、表 1 の粒度分布  $\sigma_p$  を  $S_{rough}$  のパラメータとして用いる。顔料の番号によってこのパラメータを変化させることで顔料特性による表面粗さを表現することができる。分布関数  $D$  は以下の式で表される。

$$D(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \frac{1}{S_{rough}^2 \cos^4 d} \exp\left(-\left(\frac{\tan d}{S_{rough}}\right)^2\right) \quad (10)$$

### 3.2.2 特性 2 の表現手法

特性 2 を再現するために、表 1 で計測した粒度分布  $\sigma_p$  を用いて、式 (2) における拡散反射率  $R_d$  を  $R'_d = \frac{R_d}{\sigma_p}$  に置換する。これにより、特性 2 を再現することが可能となる。

以上のように、パラメータに粒度分布を用いることで顔料特性を考慮した BSSRDF のモデル化をおこなった。

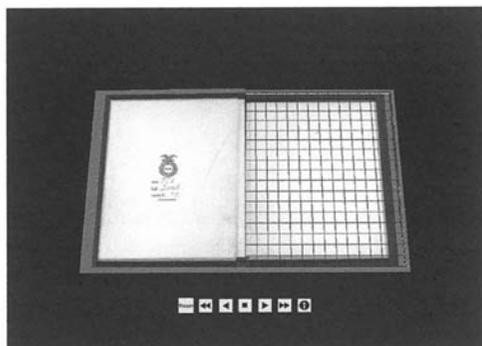


図 6: 従来手法

## 4 紙面の表現

ページめくりに伴う顔料の見えるを表現するには、紙面形状の変形を表現する必要と、その変形に伴う各点の輝度を3章で提案したモデルで計算する必要がある。

### 4.1 紙面形状の表現

従来の紙面形状の表現では、図6の様に複数の正方形メッシュを紙面に一様に配置し、各頂点を質点として変形を表現するバネモデルが用いられている。そのため図7(a)に示すような、綴じ目、紙面中央部といった紙面の変形の少ない部分でも計算量が増加するという問題が生じる。そこで図7(b)に示すように、紙面の変形が激しいページ端部ではメッシュを細かくし、その他の変形があまり起こらない部分ではメッシュを粗くすることでバネモデルの計算コストの削減を行う。以下にバネモデルの詳細を述べる。

バネモデルは、各質点に加わる外力と重力、紙面内部の内力であるバネの弾性力と減衰力が働く。この力が釣り合っている場合は静止し、崩れた場合は運動を行う。具体的な運動生成の処理を以下に示す。始めにバネモデルでは、頂点*i*にかかる力 $F_i$ を式(11)で求める。

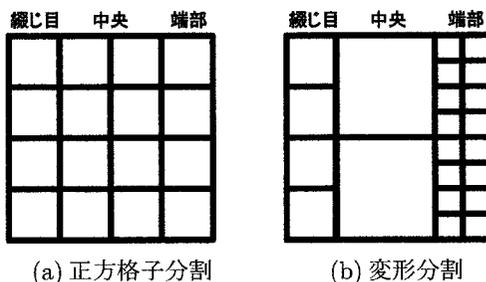


図 7: 分割方法

$$F_i = mg - \sum_j \left( k \left( 1 - \frac{L_{ij}}{|r_{ij}|} \right) r_{ij} + Dv_{ij} \right) \quad (11)$$

式(11)に示す $k$ ,  $L_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $D$ ,  $v_{ij}$ ,  $m$ ,  $g$ は、それぞれバネ定数、バネの自然長、頂点*i*に対する頂点*j*の相対位置ベクトル、ダンパー定数、頂点*i*に対する頂点*j*の相対速度ベクトル、頂点の質量、重力加速度である。

ここで用いているバネ定数は、式(12)に示すようにヤング率 $E$ 、自然状態の格子1辺の長さ $l$ で求められることが報告されている[4]。また各質点の質量 $m$ は、密度 $\rho$ 、自然状態の格子1辺の長さ $l$ を用いて式(13)で求めることが出来る。

$$E \simeq 4.64 \frac{k}{l} \quad (12)$$

$$\rho = \frac{m}{l^2} \quad (13)$$

式(11)を解き各頂点の力を求め、式(14)、(15)を求めることで、各頂点の時間変化に伴う頂点位置ベクトル $r_i$ と速度ベクトル $v_i$ を求めることができる。

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \frac{F_i(t)}{m} \cdot \Delta t \quad (14)$$

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i(t) \cdot \Delta t \quad (15)$$

上記の処理を繰り返し行う事でページめくりのアニメーションを実現する。

## 4.2 紙面の輝度計算

輝度計算は、3章で述べた顔料特性を考慮した表面下散乱モデルをベースに使用して計算を行う。本研究では紙面形状の変形に対して、リアルタイムで表現を行うことを目標にしているため、グーロー・シェーディングを用いる。

グーロー・シェーディングは、メッシュを形成する頂点の輝度を予め求めておき、任意の各点の輝度を線形補完する。そのため計算量が少なくすむという有利さがある。一方、グーロー・シェーディングよりも自然な見えを再現可能な方法としてフォン・シェーディングがある。フォン・シェーディングは、メッシュを形成する頂点から線形補完を行い各点の法線ベクトルを求め、提案したモデルを用いて輝度計算を行う。各点に対して輝度計算を行うのでリアルな見えの再現が可能であるが、計算量が膨大になりリアルタイムで処理ができないという問題がある。これに対して、グーロー・シェーディングではボケが生じるが処理は早い。そこで、本研究ではグーロー・シェーディングを用いて以下のアルゴリズムで計算を行う。

- step 1** メッシュ内で最も使用されている顔料の種類を求める。求め方は、予め用意した粒度分布の分かっているサンプルと目視によって比較することで求める。
- step 2** 表2から粒度分布 $\sigma_p$ を求め、メッシュを構成する頂点に与える。
- step 3** 提案しているモデル(3章参照)に頂点の法線ベクトルと粒度分布 $\sigma_p$ を与えて計算を行う。
- step 4** メッシュを構成する各点の輝度を、メッシュを構成する輝度から線形補完する。
- step 5** 顔料が使用されていない紙面部分は、従来のBSSRDFモデルを使用して計算を行う。

表 2: 顔料の種類と粒度分布の関係

顔料の種類	粒度分布 ( $\sigma_p$ )	
	濃い ( $\mu m$ )	薄い ( $\mu m$ )
珊瑚	100	5
群緑	70	7
群青	70	5

## 5 おわりに

本報告では顔料特性を考慮した表面下散乱モデルを用い、紙面形状の変形にもなった表現を提案した。

今後の課題として、表面下散乱モデルと紙面形状の変形は共に計算コストが高いことがある。リアルタイムにレンダリングするために、よりGPUを有効に活用するアルゴリズムやデータ構造の改良をする。また、提案した表面下散乱モデルと形状変化の組み合わせた表現の有効性を示すために、定量評価をすすめる。

## 参考文献

- [1] THE NEW ZEALAND DIGITAL LIBRARY: “3D Book Visualizer”, [http://www.nzdl.org/html/open\\_the\\_book/](http://www.nzdl.org/html/open_the_book/)
- [2] 相井 孝仁, 八木 貴司, 廣瀬 翼, 岡田 至弘: “表面下散乱モデルによる奈良絵本の表現”, 人文科学とコンピュータシンポジウム, vol.2006, no.17, pp.335-341, Dec. 2006.
- [3] Craig Donner, Henrik Wann Jensen: “Light Diffusion in Multi-Layered Translucent Materials”, SIGGRAPH 2005, pp.1032-1039, Los Angeles, August 2005
- [4] 広田 光一 等: “手術シミュレーションのための柔らかい臓器のモデルと操作環境”, Medical Imaging Technology, vol.16, No.1, pp.31-41, 1998.