## 多層表面下散乱モデルによる皮膚の異方性散乱と不均一性の表現

間下 以大<sup>†</sup> 向川 康博<sup>††</sup> 八木 康史<sup>††</sup>

† 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32
 †† 大阪大学 産業科学研究所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

 $E\text{-mail: } \dagger mashita@ime.cmc.osaka-u.ac.jp, \dagger \dagger \{mukaigaw, yagi\}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, \dagger t \{mukaigaw, yagi\}$ 

あらまし 本研究では皮膚のような複雑な構成の半透明物体を表現するモデルとして多層表面下散乱モデルを提案す る.提案モデルは3次元の多層構造を成しており,各層は単純な散乱源の集合で構成される.各散乱源はそれぞれ独 自の散乱・吸収パラメータを持ち,そのパラメータの変化によって光学的性質の変化が表現される.特定の入射光の 影響を受ける散乱源は入射光の入射位置と入射角度によって決定される.その結果,入射光による異方性散乱は各層 の散乱源での散乱の重ね合わせによって表現される.本研究では各散乱源のパラメータを推定するために,4台のプ ロジェクタと1台のカメラからなる計測装置を作成した.計測装置は各プロジェクタからグレイコードパターン,ス リットパターン,高周波パターンを投光し,パターン投光画像を撮影する.また,撮影画像に対し測光的分析と幾何 的分析行い物体表面の放射輝度分布を分離し,各散乱源のパラメータや各層の形状等を推定することができる.実験 では各層形状は入射光の表面形状に対して局所的な平面であると仮定し,各散乱源による放射輝度分布を正規分布と 仮定した.散乱源のパラメータ推定にはEMアルゴリズムを用いた.提案手法の有効性を異方性散乱と皮膚の不均質 性の二点において,表面下散乱効果を描画した結果によって評価した.その結果,異方性散乱には後方散乱の表現力 という課題が残されたものの,不均質性については皮膚内部の髭や血管等を表現可能であることが確認できた. キーワード 半透明物体,表面下散乱,双方向表面下散乱反射率分布関数

# A Multi-layered Model for Inhomogeneous and Anisotropic Subsurface Scattering of Human skin

Tomohiro MASHITA<sup>†</sup>, Yasuhiro MUKAIGAWA<sup>††</sup>, and Yasushi YAGI<sup>††</sup>

† Cybermedia Center, Osaka University 1–32 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560–0043, Japan †† The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University 8–1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567–0047, Japan

E-mail: †mashita@ime.cmc.osaka-u.ac.jp, ††{mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract This paper introduces a Multi-Layered SubSurface Scattering (MLSSS) model to express the spatial radiance distribution based on the wavelength, luminance, and direction of incoming light, as well as the structure of the skin. Each layer of the MLSSS model consists of simple isotropic scattering particles, and the spatial radiance distribution is expressed as a mixture of the simple scattering of each layer. As an experiment, we constructed a measurement system consisting of four projectors and one camera. Gray-code patterns, line sweeping patterns, and high-frequency patterns are projected from each projector and images of the object with the projected pattern are captured by the camera. The radiance distribution from anisotropic scattering in the translucent material is separated out of these captured images using photometric and geometric analysis. A radiance distribution of simple scattering in each layer is then decomposed from this separated radiance distribution. We defined the radiance distribution of a simple scattering as a Gaussian distribution whose parameters are estimated via the EM algorithm. Finally, we evaluated our method by comparing rendered images and real images.

Key words Translucent material, Subsurface scattering, BSSRDF

## 1. はじめに

表面下散乱は,半透明物体に入射した光が,物体内部 の散乱源によって幾度も反射(多重散乱)されて,入射 位置とは異なる場所から出射される現象である.これは, 出射光の放射輝度分布として現れる.また,物体入射時 の光の入射角・屈折角の関係は,スネルの法則により, 2つの媒質間の進行波の伝播速度の違いとして表現され る.屈折率は光の波長に依存することから,表面下散乱 においても,波長依存性が存在する.人間の皮膚もまた 半透明物体であることが知られており,皮膚の場合,波 長依存性は,入射光の到達深さとして現れる.

近年,コンピュータグラフィックスにおける,表面下 散乱の表現方法が提案されている.Jensen [1] らはフォ トンマッピングによって表面下散乱をシミュレートして いる.その後,ダイポール近似法を提案している[2].同 様の手法で多層化による表現も提案されているが,基本 的に等方性散乱を仮定している.Ghoshら[3]は,皮膚 の光学的振舞をスペキュラー,single scattering, shallow scattering, deep scattering として分割したモデルを提案 している.これらに代表される表面下散乱の研究によ り,より写実的な人間のレンダリングが可能になってき ている.

また,表面下散乱の計測手法も提案されている.レー ザービームを用いる手法[4],[5]や,プロジェクタを用い る手法[6],光ファイバー分光計[2]を用いる手法などが 提案されている.また,向川ら[7]は,一般光源下での 計測手法を提案している.

これらのような表面下散乱の描画・計測手法において 大胆な近似がなされている.大胆な近似によってモデル が単純になり,描画時における計算量の削減,計測時に おける最適解の得やすさといった面で都合が良い一方, 複雑な物体の場合には表現力不足の原因となる.特に, 人間の皮膚の場合その複雑な構造のため表現力不足に よって質感が低下する.

大胆な近似の一つが等方性散乱である.等方性散乱を 表面下散乱モデルに用いることによって計算コストが大 幅に削減できるというメリットがあるが,散乱の方向依 存性が失われる.方向依存性が失われると,立体的な皮 膚内部の光の振舞が表現できなくなり,皮膚内部にある 血管やメラニン色素等の構成要素の表現能力が低下す る.もう一つの大胆な近似は対象物体の均質性である. 人間の皮膚は複雑な構成をしており,深さ方向にも平面 方向にも多様な変化をしている.皮膚を均質なものと表 現すると皮膚表面や皮膚内部の構成要素,シミや黒子, 血管,などを表現できない.これらは人間の皮膚の質感 を表す上での重要な要素であり,これを無視すると,す なわち皮膚を均質な物質として扱うと,人形のような質 感となる.

このような近似では表現できない皮膚の性質をまとめ



図1 皮膚の構造

ると,様々な要因による立体的な光学的性質の変化であ る.皮膚の構成は平面方向と深度方向に変化しており, 深度方向には皮膚の多層構造による影響が現れる.また, 平面方向にはしみ,黒子等々の局所的でありながら急激 な光学的性質変化を持つものがある.また,平面方向の 変化を与える構成要素はそれぞれ存在する深さが異なる. これらの要因が総合して表面下散乱は入射光に対する皮 膚表面の放射輝度分布として現れる.

本論文では皮膚の多様な構成の結果観測される放射輝 度分布に着目し,それを再現する多層表面下散乱モデ ル(Multi-Layered Subsurface Scattering model, MLSSS model)を提案する.多層表面下散乱モデルはその名の 通り多層構造をしており,各層は立体的な位置関係をも ち光学的性質の変化と異方性を表現する.各層は単純な 散乱源で構成され,出射光の放射輝度分布は各層の散乱 の合成で表される.これにより,皮膚のような複雑な半 透明物体を各散乱源に適切なパラメータを与えることで 表現できる.

## 多層表面下散乱モデルによる皮膚の放射輝 度分布の表現

## 2.1 皮膚の光学的性質

図1に示されるように,皮膚は複雑な多層構造を成し ており,さらに各層も多くの成分で構成されている.各 層,各成分はそれぞれ異なった光学的性質を持っており, 写実的な皮膚の描画とそのための計測を難しくしている. これらの皮膚の光学的性質は主に次のようなものがある. 非等方性散乱

計算を簡単にするために等方性散乱で近似されることが あるが[2],実際には非等方性散乱である.非等方性散 乱を表現する代表的な方法は,モンテカルロシミュレー ションによる方法[8]である.このような手法では皮膚 の複雑な多層構造を表現できる有効な方法であるが,正 確な結果を得るには膨大な計算量が要求される.

#### 皮膚の多層構造

人間の皮膚は大きく分けても真皮,表皮,皮下組織とあ り,各層もさらに細分化される.また,皮膚の表面には 皮脂膜と呼ばれる薄い脂の膜が存在する.散乱や吸収と いった光学的性質は各層ごとに異なる.各層は屈折率が 異なるため,各層の境目で反射,屈折も起こっている. 皮膚の不均質性

深さ方向だけでなく平面的にも変化がある.目立ったものではシミ,血管などである.複数の層にまたがって存在するものとしては毛,髭,毛根などがある.また深い層では,コラーゲン繊維の方向や脂肪のムラ等などがある.

#### 波長依存

散乱自体が波長に依存する性質を持つものであるが,皮 膚の構成物質による波長依存性も存在する.代表的なも のでは,メラニンによる光の吸収率は波長によってこと なる.また,血管は赤い光をよく吸収し,血液(ヘモグ ロビン)は酸化・還元によって異なるが,青い波長をよ く吸収する.

皮膚内に入った光はこれらの光学的現象によって散乱, 吸収といった過程を経て最終的に皮膚表面の放射輝度分 布として現れる.本研究ではこの放射輝度分布に注目し, 多層表面下散乱モデルによって放射輝度分布を表現する.

## 2.2 放射輝度分布

皮膚の内部では構成要素とその割合が不均一に変化 している.それらの変化は光学的な振舞にも影響し,最 終的に皮膚表面上での放射輝度輝度分布として観測さ れる.Tariqらは[6]その不均一性をSpatially Varying Subsurface Scattering(SVSSS)として表現しており,写 実的な皮膚の表現には空間的な変化を表現できるモデル が必要であることを示している.

レーザー光のような一点を照らす光が照射された場合 を考えると,物体表面では空間的な放射輝度の分布とし て観測される.透過度の高いポリエチレン樹脂の様な物 体の場合図2の様に明らかな前方散乱を示す.皮膚の場 合も同様に異方性散乱が起きている.その様子を図3に 示す.図3はレーザーポインタの光を手に照射している 様子とその放射輝度分布を表したものである.図の右側 は環境照明を無くした状態(レーザー光のみ)で撮影し, その結果を疑似カラー表示したものである.図3の上段 は手と正対する位置、すなわちカメラの視点と近い位置 からレーザー光を照射したものである.一方,下段は, 画面左側から光を当てたものである.両者を比べると明 らかに下段の方が異方性散乱をしており,光の入射角度 によって散乱の様子が変化していることがわかる.出射 光の放射輝度分布は入射光の進行方向に偏っていること もわかる.また,皮膚内の散乱は一様ではないことも図3 からみてとれる.図は緑色のレーザー光ではあるが,他 の波長の場合,観測される放射輝度分布も異なってくる.

## 2.3 多層表面下散乱モデル

本論文で提案する多層表面下散乱モデルは図2や,図 3のような非対称で入射方向に依存する放射輝度分布を



図2 ポリエチレン製立方体における放射輝度分布



図 3 人間の皮膚における放射輝度分布

Observed spatial radiance distribution



図 4 多層表面下散乱モデルによる異方性散乱の表現

表現する.多層表面下散乱モデルの概念図を図4に示す. 図4右側は多層構造とみなされた半透明物体にレーザー 光が入射していて,内部で散乱により光が広がっている 様子を示している.カメラの観測では左上のグラフで示 されるような非等方性の放射輝度分布が得られる.多層 表面下散乱モデルでは観測される放射輝度分布を各層に おける散乱の重ね合わせであるとみなし,その重ね合わ せによって非等方性の複雑な分布が表現される.図4左 はグラフが各層の等方性散乱であり,その重ね合わせに よって非等方性の放射輝度分布が表現されていること示 している.

提案モデルの各層は散乱源と呼ばれる粒子の集合で表現される.各散乱源は幾何学的な情報として,属する層の

表面上での座標 x = (x, y)を持つものとする.また,各散 乱源はそれぞれ散乱と吸収のパラメータベクトル  $\pi$ を持 つものとする.散乱源の3次元座標はS(X, Y, Z)として あらわされるものとし,その物体座標は(X, Y, Z) = f(x)として得られるものとする.ここで,fは各層の表面形 状を表す関数である.各散乱源に入射する光がパラメー タ $\pi$ にしたがって散乱し,周囲の点 $x_o$ の出射光となる. 多層表面下散乱モデルでは各層での散乱は他の層に影響 を与えないものとする.ある層内の表面下散乱において 座標 $x_o$ の放射輝度Lは層内の入射点 $x_i$ に届いた入射光 の輝度  $\Phi_{x_i}$ と $x_i$ における散乱関数Dによって,

$$dL_o(\boldsymbol{x}_o) = D(\boldsymbol{x}_i)d\Phi_i(\boldsymbol{x}_i) \tag{1}$$

として表されるものとする.通常,表面下散乱による放射 輝度は,双方向表面下散乱反射率分布関数(Bidirectional Scattering Surface Reflectance Function, BSSRDF)Sに よって,

$$dL_o(\boldsymbol{x}_o, \vec{\omega}_o) = S(\boldsymbol{x}_i, \vec{\omega}_i) d\Phi_i(\boldsymbol{x}_i, \vec{\omega}_i)$$
(2)

として表される.ここで, $\vec{\omega}_i$ は入射光の方向であり, $\vec{\omega}_o$ は放射輝度の方向である.一般化された BSSRDF では 入射光の方向 $\vec{\omega}_i$ と放射輝度の方向 $\vec{\omega}_o$ を考慮する.しか し,計算量が膨大になるため等方性散乱等が仮定される 場合が多い.等方性散乱を過程した場合の BSSRDF で は入射角度と出射角度の影響はなくなる.本論文では各 層内の散乱源による散乱は等方性散乱のような単純な散 乱であるものとする.多層表面下散乱モデルでは異方性 散乱を各層が3次元的にされることで表現している.

各散乱源による散乱は,各層内のある地点における放 射輝度によって表される.ある散乱源  $p_{x_i}$ に光が当たっ た場合の $x_o$ の輝度分布は, $D(x_i, \pi_{x_i}; x_o)$ で表される. 各層のある点 $x_o$ における放射輝度 $L(x_o, l)$ は,ある点 xから入射して $x_o$ から出射する光を $x_o$ の周囲の点 $x_i$ について積分し,

$$L(\boldsymbol{x}_{o}, l) = \int_{\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{x}_{i}} D(\boldsymbol{x}, \pi_{\boldsymbol{x}}, l; \boldsymbol{x}_{o}) \Phi_{\boldsymbol{x}, l} d\boldsymbol{x}$$
(3)

となる.ここで  $\Phi_{x,l}$  は,第l層の座標xに到達した光の 照度である.入射光線は各層を通過する毎に通過した地 点の散乱源がもつ消失係数によって減衰し, $\Phi_{x,l}$ となる.

観測される輝度  $L_o(x_o)$ は,観測方向 $\vec{\omega}_o$ の放射輝度を 合成して,

$$L_o(\boldsymbol{x}_o) = \sum_l L(\boldsymbol{x}_o + \boldsymbol{d}(\vec{\omega}_o, \boldsymbol{x}_o, l), l)$$
(4)

となる.ここで, $d(\vec{\omega}_o, x_o, l)$ は,表層の観測点からl番目の層の観測点への各層平面内での移動ベクトルである. 各層の形状や距離などによって $d(\vec{\omega}_o, x_o, l)$ は決定されるが,各層の観測点は3次元的には線型である.



図 5 多層表面下散乱計測システム



Gray-codeHigh frequencyLine sweeping図 6計測システムによる撮影画像の例

## 3. 計測システム

## 3.1 ハードウェア構成

計測システムの外観を図5左上に示す.計測システム は4台のプロジェクターと1台のカメラから構成され る.本システムはブラックボックスになっており,顔を 入れる穴と,プロジェクタ投光用の穴が空いている.計 測箱の立方体は一辺が90cmである.カメラはLw160c (Lumenera)であり,有効画素数1379x1029,有効デー 夕長12bitである.プロジェクタは4台全てEMP-X5 (EPSON)であり,解像度は1024x768 画素,明るさは 22001mである.カメラと各プロジェクタの配置は,図5 右上に示す.図5右下は計測システム内部,図5左下は 計測システムの背面である.

## 3.2 幾何的測光的解析

各プロジェクタからは, グレイコードパターン, スリットパターン, 高周波パターンを投光する.図6に撮影画像の例を示す.グレイコードパターン投光の撮影画像に対する空間コード化法で幾何学的情報, すなわち, 顔の形状や, 光源方向, 視線方向などが得られる.高周波パターン投光の撮影結果には Nayar らの手法 [9] で直接反射光の分離を行う.本計測システムによ



直接反射光成分 非直接反射光成分 図 7 Nayar らの手法 [9] による直接反射光成分分離の結果



図 8 幾何的測光的解析による散乱パラメータ推定の流れ

る直接反射光成分と非直接反射光成分の分離結果を7に 示す.本計測システムはほぼ暗室であり環境光は極力抑 えられているため,非直接反射光成分は表面下散乱成分 と等しいとみなすことができる.図7の非直接反射光成 分からは皮膚内部の血液による赤みや髭などがはっきり と見て取れる.一方,直接反射光成分からは,皮膚の表 面の皺などがはっきりと見て取れる.直接反射光成分を 用いた4光源フォトメトリックステレオ法[10]によって 皮膚表面の法線ベクトルを計測する.これらによって得 られた情報とスリットパターン投光の撮影結果から1次 元の放射輝度分布を分離する.この放射輝度分布を各層 の散乱源による等方性の放射輝度分布の混合分布とみな し,各層の形状や各散乱源の散乱パラメータを推定する. 図8に処理の流れを示す.

投光パターンは各プロジェクタにつきグレイコード 40 パターン,スリット 20 パターン,高周波 6 パターン,白 色光 1 パターンの計 67 である.グレイコードパターン 投光は,プロジェクタの解像度は 1024x768 画素であり 最大限の精度を得るため,X 方向 Y 方向に各 10 ビット のデータ長が必要である.即ち X,Y 方向毎に 10 枚の投 光パターンを用意する.さらに精度向上のために,反転 パターンも用いるので,40 パターンのグレイコード画 像を投光する.スリットパターン投光では,幅3 画素の スリット光を30 画素間隔で配置したパターン光を投光 する.各パターン光は3 画素ずつシフトさせ,計10 パ ターンのスリットパターン光を投光する.高周波パター ン投光では,白黒3 画素の幅を持った縞パターンを1 画 素ずつシフトさせ,計6枚の高周波パターン光を投光す る.白色光パターンは比較用画像の撮影用である.撮影 スピードは秒間5 フレーム程度であり,およそ40~50 秒程度の撮影時間が必要である.

#### 4. 実 験

本実験では,各散乱源による放射輝度分布を正規分布 とし,観測された放射輝度分布は混合正規分布であると 仮定した.すなわち,各正規分布の平均・分散を散乱源 の表面下散乱パラメータとし,各正規分布の重みを散乱 係数とした.最下層を通過して散乱されなかった光は吸 収されるものとした.また,各層は局所的に平面である と仮定し,各層間の距離を一定とした.すなわち,式4 における d( $\vec{\omega}_o, x_o, l$ )を

$$\boldsymbol{d}(\vec{\omega}_o, \boldsymbol{x}_o, l) = l * d_l \left( \frac{\vec{\omega}_o}{(\vec{\omega}_o, \vec{N}_o)} - \vec{N}_o \right)$$
(5)

とした.ここで、(,) は内積を表し、 $\vec{N_o}$  は観測点  $x_o$  の 法線ベクトル、 $d_l$  は各層間の距離である.各分布の推定 は EM アルゴリズムで行った.多層モデルを 20 層の構 成、すなわち混合分布の混合数を 20 とした.描画では カメラを固定し、光源位置を変化させて描画を行った. 散乱源の密度はカメラの画素と同一とした.カメラとプ ロジェクタのキャリブレーションは同じグレイコードパ ターンを用いて行った.プロジェクタの輝度についても 測光計を用いて補正を行った.

多層表面下散乱モデルの効果を評価するため,4つの 光源のうち,3つの光源から表面下散乱のパラメータを 推定し,残りの1つを比較用とした.3つの光源からは それぞれ表面下散乱パラメータが得られるが,実験では その平均値を用いた.カメラと光源の位置は比較用のも と同じ位置とした.実験は表面下散乱の非等方性と不均 質性に2点について評価を行った.

#### 4.1 非等方性散乱の評価

表面下散乱の非等方性について,コードパターンを 投光した画像を合成して評価を行った.画像合成の結果 を図9に示す.図9(a)は合成した表面下散乱成分であ る.図9(b)は高周波パターン画像をNayarらの手法[9] によって分離した直接反射成分である.図9(c)は合成し た表面下散乱(a)に直接反射成分(b)を加えたものであ る.図9(d)は比較用の実画像である.図9の結果から, 合成した表面下散乱に直接反射を加えることで,実画像 に近い画像が合成できていることがわかる.また,図9







(c) 表面下散乱+直接反射(d) 実画像図 9 コードパターン投光画像の合成



の画像における額部分 X 軸方向の R 成分の輝度値の変 化を図 10 に示す.図 10 で輝度がほぼ0 になっている部 分は,直接光があたっていない部分である.また,図 10 で光源位置は右側にあり,光は右から左へと侵入してい る.表面下散乱の効果によって,直接光があたっていな い部分からも散乱光が射出されている様子が再現されて いることがわかる.この結果から,光の進行方向につい ての散乱は実画像とほぼ同等に表現されていることがわ かる.一方,進行方向と反対側の散乱については上手く 表現されていないことがわかる.

## **4.2** 不均質性の評価

皮膚の不均質性の再現性を評価するために, 白色光源

を設定して画像を合成した.合成結果を図11に示す.図 11(a) は実画像より分離された直接反射成分,図11(b)は 本手法により合成された表面下散乱成分である.図11(c) は図 11(a) と図 11(b) を合成したものである.図 11(d) は各散乱源のパラメータを均質化して合成した表面下散 乱成分に直接反射成分を加えたものである、均質化は波 長毎の皮膚全体のパラメータを平均し,それを全散乱源 で用いることで行った.図11(e)は比較用の実画像であ る.図11(c)には,頬の赤みや皮膚内部の髭,血管等が 描画されていることがみてとれる.一方,図11(d)は, 表面下散乱の効果によって直接反射成分よりはやわらか みのある表現になっているが,全体的に色合いに変化が なく均質な表現になっている.また,図11(c)と比較す ると頬の赤みなどが表現されていない.このことから, 不均質なパラメータを用いることによって皮膚内部の表 現が可能になり,より写実的な表現が可能になっている ことがわかる.

## 5. おわりに

本論文では,人間の皮膚のような複雑な構造を持った 半透明物体を表現する、多層表面下散乱モデルを提案し た.提案モデルは3次元の多層構造であり,各層はそれ ぞれ異なるパラメータを持つ散乱源の集合である.提案 モデルの多重表面下散乱表現による出射光の放射輝度分 布は入射光の波長,輝度,入射方向,観測方向によって 変化する.これは,入射光と観測方向によって影響を受 ける散乱源が変化することによって表現される.また, 各散乱源のパラメータを推定するために、4台のプロ ジェクタと1台のカメラからなる計測装置を作成した. 撮影装置は各プロジェクタからグレイコードパターン, スリットパターン,高周波パターンを投光し,パターン 投光画像を撮影する.提案システムでは,撮影された画 像に対して測光的分析と,幾何的分析を合わせて出射光 の放射輝度分布を分離し,同時に撮影対象の法線ベクト ルや形状等も計測する.実験では実際に表面下散乱を描 画し、皮膚の質感が表現できることを確認した.また、 本実験では前方散乱を表現できたが,光の侵入方向と反 対方向の散乱が上手く表現できていないことがわかった. これは,皮膚内部ではレイリー散乱のような後方にも強 く散乱する性質があるためと思われる.

実験では、このモデルの層構造を観測データを表現す るための均等な間隔の層構造としたが、各層の形状を実 際の皮膚の構造を元に構成することもできる.また、散 乱モデルについても、正規分布ではなく、ダイポールモ デルやレイリー散乱、ミー散乱といった、非等方性散乱 をモデルとすることもできる.今後はより皮膚の質感表 現を高めるために、散乱モデルの検討などを行う.これ により、今回の実験では表現できなかった、後方散乱の 表現が可能になると思われる.





表面下散乱



表面下散乱 + 直接反射

図 11 白色光源の場合の描画



均質な表面下散乱 + 直接反射

実画像

# 直接反射成分

## 謝 辞

本研究の一部は, 文部科学省科学技術振興調整費「新 映像技術ダイブイントゥザムービーの研究」により進め られた.

#### 文 献

- H. W. Jensen: "Realistic Image Synthesis using Photon Mapping," AK Peters (2001).
- [2] T. Weyrich, W. Matusik, H. Pfister, B. Bickel, C. Donner, C. Tu, J. McAndless, J. Lee, A. Ngan, H. W. Jensen, and M. Gross: "Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model," Proc. SIGGRAPH2006, pp. 1013– 1024 (2006).
- [3] A. Ghosh, T. Hawkins, P. Peers, S. Frederiksen and P. E. Debevec: "Practical modeling and acquisition of layered facial reflectance," ACM Trans. Graph., 27, 5, p. 139 (2008).
- [4] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy and P. Hanrahan: "A practical model for subsurface light transport," Proc. SIGGRAPH2001, pp. 511–518 (2001).
- [5] M. Goesele, H. P. A. Lensch, J. Lang, C. Fuchs and H. P. Seidel: "Disco - acquisition of translucent objects," Proc. SIGGRAPH2004, pp. 835–844 (2004).
- [6] S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec and G. Turk: "Efficient estimation of spatially varying subsurface scattering parameters," Proc. Int'l Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization (VMV2006), pp. 165–174 (2006).
- [7] Y. Mukaigawa, K. Suzuki, Y. Yagi: "Analysis of subsurface scattering under generic illumination," Proc. International Conference on Pattern Recognition (ICPR2008) (2008).
- [8] L. Wang, S. L. Jacques and L. Zheng: "Mcmlmonte carlo modeling of light transport in multilayered tissues," Computer Methods and Programs in Biomedicine, 47, 2, pp. 131–146 (1995).
- [9] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg and R. Raskar: "Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination," Proc. SIGGRAPH2006, pp. 935–944 (2006).
- [10] S. Barsky and M. Petrou: "The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25, 10, pp. 1239–1252 (2003).