

曲率依存反射関数を用いた 半透明物体における照度差ステレオ法の改善

岡本翠^{†1} 久保尋之^{†2} 向川康博^{†2} 森島繁生^{†3}

本研究では、多重散乱が支配的な半透明物体における、表面下散乱現象を考慮した照度差ステレオ法の改善を提案する。照度差ステレオ法は、複数の照明条件下における物体の陰影情報から法線を推定する手法である。入射光が物体内で表面下散乱を繰り返す半透明物体においては、単純なランバート反射を仮定した解析では散乱による影響を考慮できていない。そこで我々は、半透明物体における表面下散乱現象の近似的なモデルである曲率依存反射関数を用いることで、高速に法線を推定する手法を提案する。まず、ランバート拡散反射を仮定して取得した初期法線情報から、物体表面における曲率を計算する。つぎに、計算された曲率の値に応じて反射関数を適用し、法線の再計算を行うことで、表面下散乱の影響を考慮した法線の推定を行う。

1. はじめに

人間の肌や大理石に代表される半透明物体では、物体に入射した光が物体内部に滲入し多重に散乱を繰り返す表面下散乱現象が発生する。従って、物体表面のある点における出射光は、その点に入射する光線だけでなく、周囲に入射する光線にも大きく影響を受ける。そのため、古典的な照度差ステレオ法で想定されている不透明物体における法線と陰影との関係に比べ、半透明物体における法線と陰影の関係は複雑になり、結果として半透明物体における法線の推定は困難であるといえる。

本稿では、半透明物体を対象として、複数の照明条件下における物体の陰影情報から法線を推定する手法を提案する。散乱パラメータとして物体表面における曲率に着目して表面下散乱現象を局所照明モデルとして扱うことで、半透明物体における法線を推定する手法を提案する。まず、ランバート反射を仮定して取得した初期法線から、物体表面における曲率を計算する。つぎに、表面下散乱現象を考慮した反射関数を曲率の値に応じて算出し、それを用いて法線の再計算を行う。以上により、半透明物体に対する法線推定の手法を提案する。

2. 関連研究

2.1 照度差ステレオ法

照度差ステレオ法は、複数の照明条件下における物体の陰影情報から、物体表面をランバート反射面と仮定することで物体の法線情報を推定する手法である^{[1][2]}。しかしながら、非ランバート反射面である半透明物体を対象にした法線推定は、形状と陰影の関係が非常に複雑になるため、困難であるとされている。

近年では、半透明物体を対象とした推定手法も提案され

てきた。偏光板や構造化光を用いて散乱光成分をあらかじめ除去することで、直接反射成分のみから法線を推定する手法^{[3][4][5][6]}があげられるが、特殊な撮影環境が必要となる。また、拡散反射が散乱フィルタによりぼけたものとみなすことで、元の法線を推定する手法^{[7][8]}も提案されている。しかし、この手法は、計算された初期法線情報に対し、逆畳み込み積分の計算を行う必要がある。そのため、画素ごとにローカルに解を求めることができず、計算コストが大きくなるのが問題として挙げられる。

2.2 表面下散乱現象のモデル化

コンピュータグラフィックスの分野においては、写実的なCG画像の生成を目的として表面下散乱の数理モデル化が進められてきた。

不透明物体における反射モデルでは、光が入射した地点で反射が発生するため、双方向反射率分布関数 (BRDF) で表現することが可能である。しかし、半透明物体においては、表面下散乱現象が発生するため、BRDFでモデル化することは困難である。そのため、半透明物体に適用可能な反射関数として、双方向散乱面反射率分布関数 (BSSRDF) がしばしば用いられている。Jensenらは、半透明物体を局所的に十分大きな平面と仮定することで、物体内部での散乱現象を双極子や多重極子で近似し、BSSRDFモデルとして表現した^[9]。これにより、入射光を逐一追跡するフォトンマップやライトトレーシングなどの手法と比較して、計算時間を大幅に短縮し、表面下散乱を考慮した品質の高い描画が可能となった。しかし、未だ長い処理時間を要するため、リアルタイムで計算することは難しい。また、本来は3次元空間上で生じる散乱現象を、2次元の画像空間内での現象として近似することで高速化を図る手法^[10]が提案されている。しかし、畳み込み計算を行う必要があるため、BRDFモデルとして表現することはできず、ローカルに輝度を計算することができない。

そこで本研究は、半透明物体における陰影を曲率に着目して局所照明モデルとして近似することで、ローカルに法線を推定する手法を提案する。

^{†1} 早稲田大学

Waseda University

^{†2} 奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

^{†3} 早稲田大学理工学術院理工学総合研究所

Waseda Research Institute for Science and Engineering

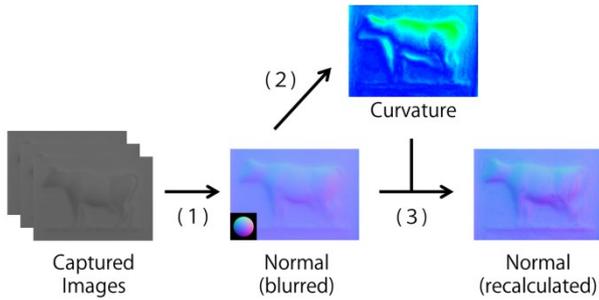


図1 法線推定の流れ

3. 提案手法

3.1 概要

本研究における問題設定は、光源位置は既知、視点位置を固定とする古典的な照度差ステレオ法と同様である。無限遠の点光源を仮定し、複数の方向から光を照射した観測画像から物体の法線を推定する。法線推定の流れを図1に示す。曲率依存反射関数 (Curvature-Dependent Reflectance Function : CDRF) ^[11]を用いて法線の推定を行う。CDRFについては3.2節において詳述する。

(1) 古典的な照度差ステレオ法による法線推定

既知の光源方向を用いて古典的な照度差ステレオ法を適用し、初期法線を推定する。

(2) 曲率の取得

得られた法線をもとに、物体表面上における曲率を計算する^[12]。

(3) 法線の再計算

計算された曲率の値に応じて後述する CDRF を適用し、初期法線を基準として法線の再計算を行う。上記(2)および(3)の手順を繰り返し適用することで、最終的な法線を推定する。

3.2 曲率依存反射関数 (CDRF)

半透明物体に光を照射した際、内部で光が散乱し、直接光が照射していない部分でも明るく見える表面下散乱現象が発生する。反射特性が未知の物体に対し、球形状の物体から反射関数を取得する手法^[13]は提案されているが、半透明な球に光を照射した際には、球の半径に応じて反射関数に変化する。実際に様々な曲率の半透明球に右側から平行光を照射した撮影画像を図2に示す。左から球の曲率が大きくなるよう順番に並んでおり、半径 $r=35, 25, 15$ [mm]の蠟を用いて作成した球である。なお、比較のため見かけの大きさが等しくなるよう調整を行っている。この撮影画像から、半透明物体は、光が直接当たっていない領域に関しても内部で光が浸透し、明るく見えることがわかる。また、曲率の大きい球の方が、曲率の小さい球に比べて相対的に光が透過しやすいことが観測できる^[14]。そのため、球の半

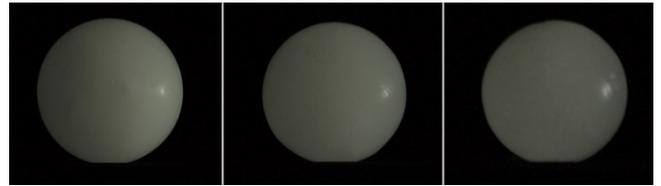


図2 半透明球に光を照射した様子

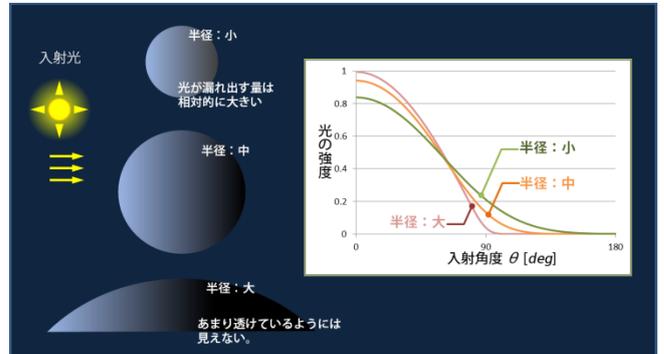
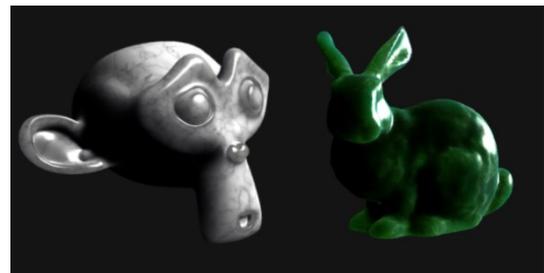


図3 曲率依存反射関数 (CDRF)



(a) Monkey (b) Bunny

図4 CDRFによる描画結果

径、つまり曲率に応じて反射関数を定義する必要がある。

Kuboらは、曲率と光の滲入度合の関係をフォトン追跡法により取得することによって、曲率依存反射関数 (CDRF) を提案し、半透明物体の局所照明モデルでの表現を可能とした。半透明物体では、入射光は物体内部で一定の広がりをもって散乱する。そのため、球の表面に入射する光 L_i と、ある曲率から求められる σ に従うガウス関数 $g(\theta_i, \sigma)$ との畳み込み積分を行うことにより、CDRFの近似式を取得する。なお、 θ_i は入射光 L_i と物体表面の法線 n のなす角を表す。

また、物体表面における出射光のフレネル透過率を考慮すると、式(1)は式(4)の様に表現できる。ただし、視線方向ベクトル v_i と物体表面の法線 n のなす角を φ_i 、相対屈折率を η とする。

$$f_r^c(\theta_i, \kappa) = (L_i * g)(\theta_i) \quad (1)$$

$$L_i = \max(\cos \theta_i, 0) \quad (2)$$

$$g(\theta_i, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(k)^2}} \exp\left\{-\frac{\theta_i^2}{2\pi\sigma(k)}\right\} \quad (3)$$

$$f_r^c(\theta_i, \kappa) = (L_i * g)(\theta_i) * F_t(\varphi_i, \eta) \quad (4)$$

3.3 CDRF を用いた法線再計算手法

本節では、様々な方向から光を対象物体に照射した様子を撮影した k 枚の画像のうち、 m 番目 ($m \in [1, k]$) の画像のある画素における輝度値 I_m から、法線を推定する手法について説明する。本研究における法線の再計算は各画素に独立して適用可能なため、後述する手順をすべての画素に対して適用すればよい。

まず、古典的な照度差ステレオ法を用いてランバート余弦則に基づき式(5)を満たす法線 \mathbf{n}_0 を推定する。

$$\mathbf{n}_0 = \arg \min_{\mathbf{n}} \sum_{m=1}^k |I_m - L_{i,m}(\boldsymbol{\theta}_{i,m}(\mathbf{n}))| \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\theta}_{i,m}(\mathbf{n}) = \cos^{-1}(\mathbf{l}_{i,m} \cdot \mathbf{n})$$

次に、注目する画素における曲率 κ を求める。さらに、得られた曲率と法線を用いて CDRF を計算し、式(6)を満たすような法線 \mathbf{n}_1 を新たに推定する。なお、法線 \mathbf{n}_1 の推定を行う際には、法線 \mathbf{n}_0 と入射光 $\mathbf{l}_{i,m}$ の関係を考慮し、式(5),(6)における $\boldsymbol{\theta}_{i,m}(\mathbf{n})$ は同一平面上にあると制約を加えることで、安定して法線を推定可能となった。本手法では、散乱パラメータ σ が物体表面の各点において変化する光学的に不均一な計測対象においても、独立に計算することが可能である。

$$\mathbf{n}_1 = \arg \min_{\mathbf{n}} \sum_{m=1}^k |I_m - f_r^c(\boldsymbol{\theta}_{i,m}(\mathbf{n}), \kappa) * F_t(\boldsymbol{\varphi}_i, \eta)| \quad (6)$$

4. 実験

本章では、シミュレーションによって得られた合成画像と撮影画像を用いて、それぞれ本手法を適用した結果を示し、効果を検証する。

4.1 シミュレーション

まず、合成画像に対して本手法を適用する。光源として平行光を用い、CDRF によって描画した 12 枚の画像を入力として法線の推定を行った。推定した結果をそれぞれ図 5, 6 に示す。なお、物体の大きさはそれぞれ 30[mm]程度、材質は石鹸を仮定して物体の光学特性を設定した。

ランバート反射を仮定した照度差ステレオ法を適用した推定法線を(a)に示し、これを初期法線として本手法を適用した結果を(b)に示す。また、真値との誤差を可視化結果と、平均二乗誤差をそれぞれ(c)(d)に示す。本手法を適用することで、真値に近い法線が推定できたことがわかる。

4.2 実物体

実環境におけるデータセット^[8]を用いて、本手法を適用する。撮影に用いられた物体を図 7 に示す。材質はそれぞれ石鹸とプラスチックである。撮影画像は、遠方から点光源を照射した撮影画像 12 枚であり、法線の推定結果をそれぞれ図 8, 9 に示す。なお、散乱パラメータは、文献[14]の

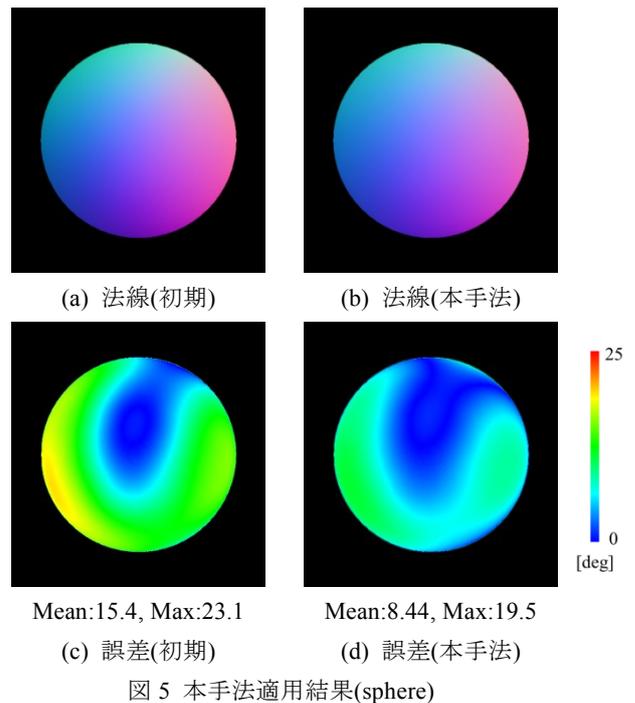


図 5 本手法適用結果(sphere)

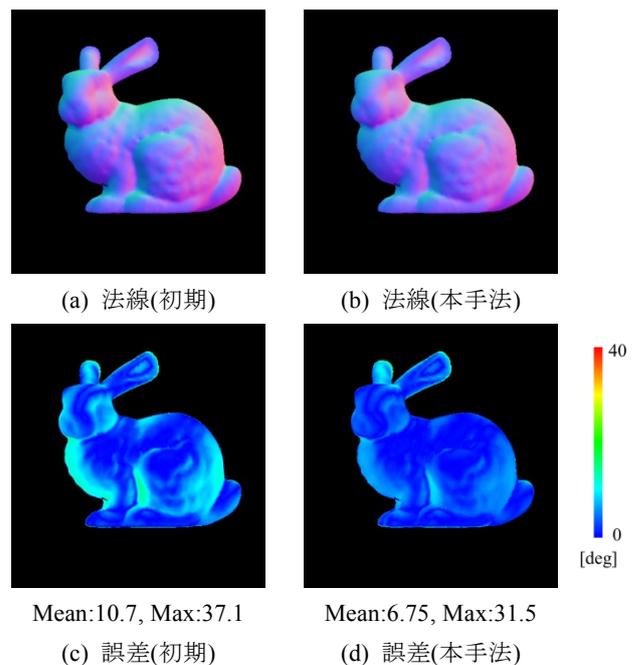


図 6 本手法適用結果(Bunny)

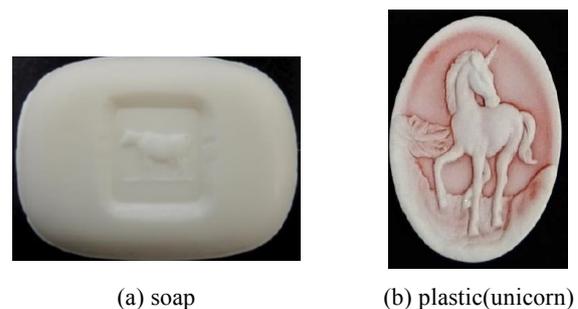


図 7 データセット(一般照明環境下)

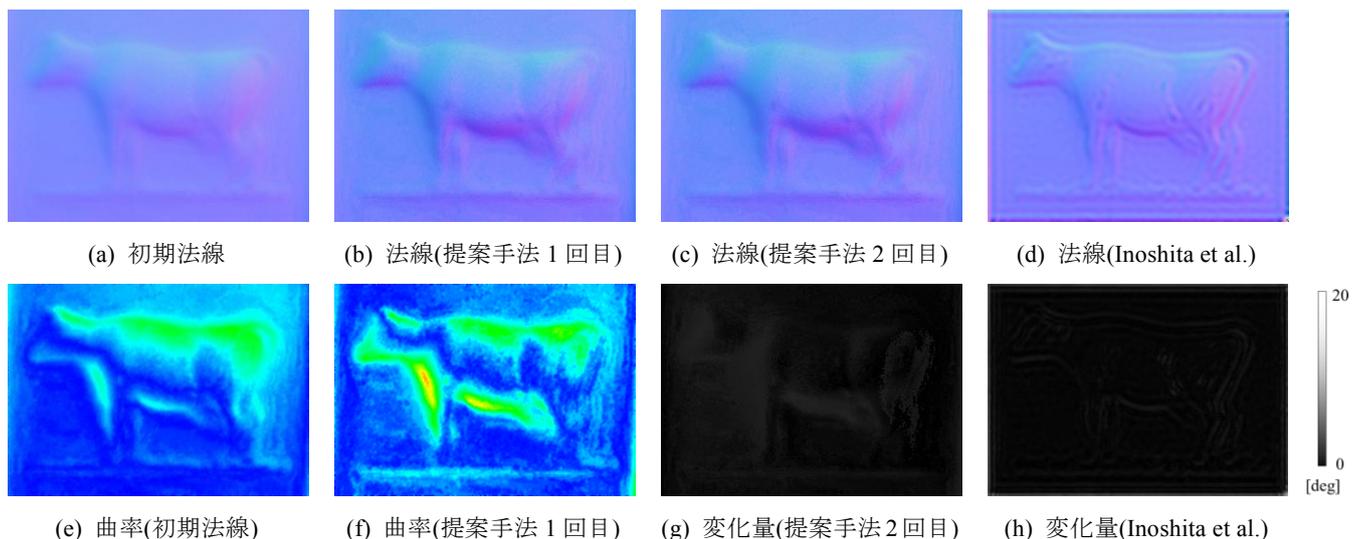


図8 本手法適用結果(soap)

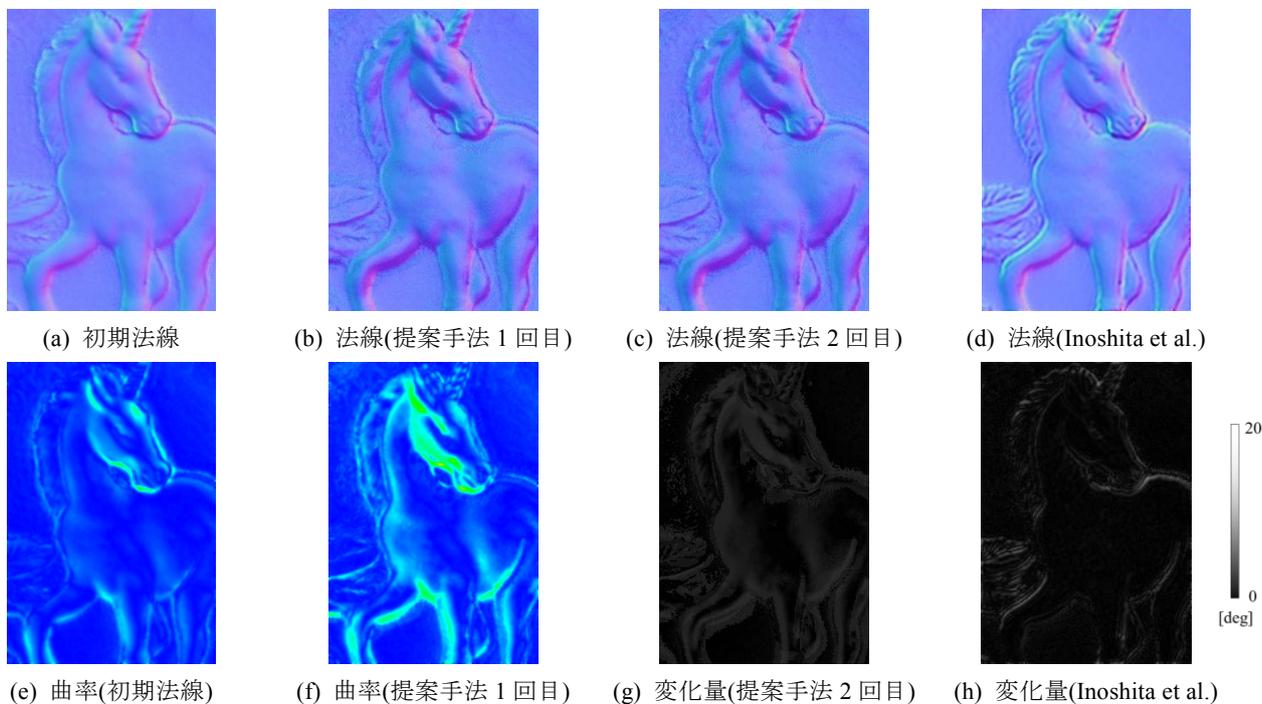


図9 本手法適用結果(plastic(unicorn))

ものを用いた。

4.1 節と同様に、ランバート反射を仮定した照度差ステレオ法を適用した結果を(a)に示し、初期法線をもとに計算した曲率を(e)に示す。取得した曲率の値をもとに法線の推定を行うと、(b)に示すような推定法線が得られた。なお、同様の計算を繰り返した結果をそれぞれ(c),(f)に示す。また、Inoshitaらの手法^[8]を適用した結果を(d)に示し、初期法線からの変化量をそれぞれ(g),(h)に示す。白い領域において、より法線の再計算が行われたことを示している。本手法を適用した結果、表面下散乱の影響を受けやすい曲率が大きい領域を中心に、既存手法に比べて画像上のより多くの領域において法線の再計算が行われたことがいえる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、表面下散乱の影響を曲率に着目して局所照明モデルとして扱うことで、半透明物体における法線の推定手法を提案した。曲率依存反射関数での近似が成り立つ多重散乱が支配的な物体においては、シミュレーション結果において誤差が低減されたことから、有用であることが示された。また、実画像を用いた実験を行い、従来手法との差異を比較した。

今後の課題としては、法線推定の精度の定量的な評価や、並列計算による法線推定の高速度が挙げられる。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 15K16027 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Woodham, R.J.: Photometric Method For Determining Surface Orientation From Multiple Images. *Optical Engineering* 19 (1980) 139-144
- 2) Lambert, J.H.: *Photometria sive de mensura de gratibus luminis*. Eberhard Klett In Eberhard Klett (1760)
- 3) Chen, T., Lensch, H.P.A., Fuchs, C., Seidel, H.P.: Polarization and Phase-shifting for 3D Scanning of Translucent Objects. In: Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). (2007)
- 4) Chen, T., Seidel, H.P., Lensch, H.P.A.: Modulated phase-shifting for 3D scanning. In: Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). (2008)
- 5) Gu, J., Kabayashi, T., Gupta, M., Nayar, S.K.: Multiplexed Illumination for Scene Recovery in the Presence of Global Illumination. In: Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV). (2011)
- 6) Gupta, M., Agrawal, A., Veeraraghavan, A., Narasimhan, S.G.: A Practical Approach to 3D Scanning in the Presence of Interreflections, Subsurface Scattering and Defocus. *International Journal of Computer Vision (IJCV)* 102 (2012) 33-55
- 7) Dong, B., Moore, K., Zhang, W., Peers, P.: Scattering Parameters and Surface Normals from Homogeneous Translucent Materials using Photometric Stereo. In: Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). (2014)
- 8) Inoshita, C., Mukaigawa, Y., Matsushita, Y., Yagi, Y.: Surface Normal Deconvolution: Photometric Stereo for Optically thick Translucent Objects. In: Proc. of European Conference on Computer Vision (ECCV). (2014)
- 9) Jensen, H.W., Marshner, S. R., Levoy, M. and Hanrahan, P., "A Practical model for subsurface light transport", In Proc. of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'01, pp.511-518. (2001).
- 10) Jimenez, J., Sundstedt, V. and Gutierrez, D., "Screen-Space Perceptual Rendering of Human Skin", In ACM Trans. Appl. Percept. 6, 4, 1-15. (2009)
- 11) Kubo, H., Dobashi, D., Morishima, S., "Curvature Dependent Reflectance Function for Rendering Translucent Materials", In ACM SIGGRAPH '10. (2010)
- 12) Vergne, R., Pacanowski, R., Barla, P., Granier, X., Schlick, C., "Light Warping for Enhanced Surface Depiction" In ACM SIGGRAPH'09. (2009)
- 13) Hertzmann, A., Seitz, S., "Example-based photometric stereo: shape reconstruction with general, varying BRDFs", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(8):1254-1264. (2005)
- 14) Okamoto, M., Adachi, S., Okami, K., Ukaji, H., "Measured Curvature-Dependent Reflectance Function for Real-time" In ACM SIGGRAPH '14. (2010)