

半透明物体における曲率と透過度合の相関分析

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

本研究では、半透明物体の内部で生じる光線の表面下散乱現象の解析を目的として、物体表面の曲率と表面下散乱現象との相関を検討する。コンピュータグラフィックス分野では、画像の生成を目的として表面下散乱現象のモデル化が積極的に行われてきたが、物理ベースの光学シミュレーションは計算負荷が高いため、このようなモデルを用いて画像の解析を行うことは非常に困難である。そこで本研究は、表面下散乱現象のモデルとして、計算コストが低い近似的なモデルである曲率に依存する反射関数(CDRF)に着目する。様々な曲率の半透明物体における表面下散乱の計測結果をもとに、曲率と光の透過度合との相関を分析することによって、CDRFを用いた半透明物体の画像解析の有効性を検証する。

1. はじめに

映画やゲームなどのCGコンテンツにおいて、人間の肌や大理石に代表される半透明物体が描画されるシーンは多く存在する。しかし、半透明物体の外観を物理的に正確に描画するためには、物体に入射した光が物体内部に侵入して多重に散乱を繰り返す表面下散乱の影響や、物体表面における光の反射特性を考慮する必要がある。そのため、このような物体のレンダリングには一般に多大な計算コストを要し、リアルタイムでの物理的に正確なレンダリングは困難であると言える。したがって、ゲームなどの実時間レンダリングが求められる場面では、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ったり^[1]、テクスチャ空間で散乱を近似したりする^[2]ことで半透明の近似表現を行い計算コストの削減を図ることが多いが、必ずしも高品質な描画結果とはならない。そのため、半透明物体を高速かつ、より高品質に表現する手法が必要とされている。

我々は、Kuboらの物体の曲率に着目した半透明物体の高速描画手法に着目する。Kuboらはフォトン追跡法を用いて曲率と光の透過度合を取得することで、曲率に依存した反射関数(Curvature-Dependent Reflectance Function : CDRF)を提案した^{[3][4]}。CDRFを用いたレンダリングでは、描画を行う際の計算負荷が非常に軽く、疑似的に半透明物体における表面下散乱現象を表現することが可能であるため、コンピュータグラフィックスの分野では広く用いられている。しかし、物体の曲率だけに注目した近似であるため、材質、形状等が変化した際にどの程度近似が成り立つかは未知である。

本稿では、曲率を半透明物体の散乱パラメータとして着目し、実測データをもとに曲率と光の透過度合の関係を取得することで、CDRFを用いた半透明物体の画像解析の有効性を検証する。実際に様々な半径の半透明球に光を照射

し、得られた撮影結果から球の法線と光源方向の成す角に対する輝度分布を測定する。さらに、球の法線と視点方向の成す角に対する輝度値の変化に着目し、半透明物体における視点位置と輝度の関係も合わせて取得する。また、ダイポールモデルに基づき半透明球における光の挙動をシミュレーションする。取得したシミュレーション結果から、球の法線と光源方向の成す角に対する輝度分布を測定する。また、球から立方体に形状を徐々に変化させ、同様にシミュレーションを行うことで、形状の変化が光の透過度合に与える影響を考察する。以上により、半透明物体における曲率と表面下散乱との関連性を導き、CDRFの有効性を検証する。

2. 関連研究

半透明物体では、入射した光の一部が物体内部で散乱を繰り返し、入射した光の位置とは異なる位置から物体外部に射出されるため、直接光が照射されていない部分においても射出光を確認できる。このような複雑な光の挙動を表面下散乱と呼び、写実的な半透明物体の描画を行うためには欠かすことができない。表面下散乱は物体内部で一度だけ散乱し物体表面に射出する単一散乱^{[5][6]}と、物体内部で複数回散乱した後に物体表面に射出する多重散乱^[7]に分類される。特に人間の肌や大理石、ミルクなど透明度の低い物体においては多重散乱の影響が大きい。多重散乱の影響が支配的な物体の描画を行う際には、入射光のみからではなく周囲の点からの入射光の影響を考慮する必要があり、より計算コストが高くなる。そのため、この計算コストを軽減するための様々な近似手法が提案されている。

Jensenら^[8]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た。これにより、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、1フレームあたり数十秒程度の処理時間を要し、リアルタイムレンダリングには程遠い。Wrap Lighting^[9]は、直接光が照射されない領域である、光源と法線の成す角が90°を超えた範囲に関しても輝度値が0にならないようデ

†1 早稲田大学

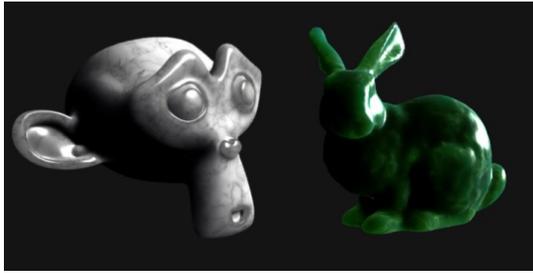
Waseda University

†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



(a) Monkey (b) Bunny

図1 CDRFによる描画結果

ィフューズ関数を調整する手法である．半透明物体によく見られる光の回り込む現象の描画が可能である．しかし，物体の形状に関係なく同じ透過度合の表現を行うため，妥当性を欠いた近似であるといえる．

本手法と関連した研究として，Kuboら^{[3][4]}の物体の曲率に着目した半透明物体の高速描画手法がある．Kuboらは，曲率と光の透過度合の関係をフォトン追跡法により取得し，曲率に依存する反射関数(Curvature-Dependent Reflectance Function: CDRF)を提案することで，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と，ある分散 σ に従うガウス関数とで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．

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

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

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

物体表面の起伏から曲率を取得し，指標として用いることで，物体の形状に応じた半透明物体らしい光の透過現象の高速な描画を可能とした．しかし，Kuboらは高速化を目標として反射関数をより単純化するために，光は等方的に散乱するという仮定のもとでシミュレーションを行った．そのため，取得した曲率と透過度合の関係は光の指向性を考慮しておらず，表面下散乱による光の減衰や，物体表面における出射光の指向性と視点方向による輝度値の変化を正しく表現しているとはいえない．

本論文では，様々な曲率の半透明物体における表面下散乱の計測結果をもとに，CDRFを用いた半透明物体の画像解析の有効性を検証する．まず3章では，実写画像を解析することにより，半透明物体における各曲率に対応した光の透過性をより正確に取得する．さらに4章において，様々な曲率の半透明物体における表面下散乱の計測結果をもとに，曲率と光の透過度合との相関を分析することによって，CDRFを用いた半透明物体の画像解析の有効性を検証する．

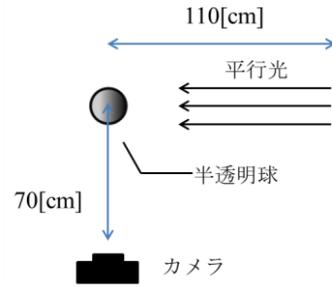


図2 撮影環境

3. 実測による曲率と透過度合の取得

本章では，半透明物体における反射特性を分析するため，様々な曲率の半透明球に光を照射し，その様子を撮影する．撮影データを用いて，球の法線と光源方向の成す角 θ における輝度値分布を取得する．また，球の法線と視点方向の成す角 φ における輝度値分布についても同時に分析を行い，取得データから視点の影響を取り除く補正を加える．以上により，実測に基づき曲率と透過度合の関係を取得する．

3.1 実験環境

データの取得を行うための撮影環境を図2に示す．本撮影では被写体として半透明の材質でできた球体を使用する．本研究では，蠟と石鹼の2種類の材質でできた球体を用意した．光源から半透明球までの距離は110[cm]，カメラのレンズから半透明物体の中心までの距離は70[cm]と設定した．撮影画像から，球の法線と光源方向の成す角に対する輝度値の関係を取得する．環境光による影響を軽減するため，周囲を黒い布で覆った．また，本研究では多重散乱光の計測を目的としている．そのため，球体の表面で生じる鏡面反射光を取り除くため，カメラのレンズに円偏光フィルタを取り付けて撮影を行った．なお今回撮影に用いた半透明球の半径 r はそれぞれ35, 30, 25, 20, 15[mm]とした．

3.2 撮影結果と輝度値取得

3.2.1 撮影結果

3.1の撮影環境において取得した撮影画像を(a)から(e)，(f)から(j)の順に曲率が大きくなるよう，蠟と石鹼に関してそれぞれ図3に示す．なお，比較のため画像内の球の見かけの大きさがそれぞれ等しくなるように調整を行った．図3より，半透明球に光を当てた際には直接光が照射されない範囲である $\theta > 90^\circ$ の領域でも内部で光が散乱し，球体の表面に出射光の存在が確認できる．また，曲率が小さい球(図3-(a)，(f))に対し，曲率が大きい球(図3-(e)，(j))は照射光がより透過していることが確認できる．また，蠟より石鹼で作成した球の方が透明度が低く，多重散乱が支配的で

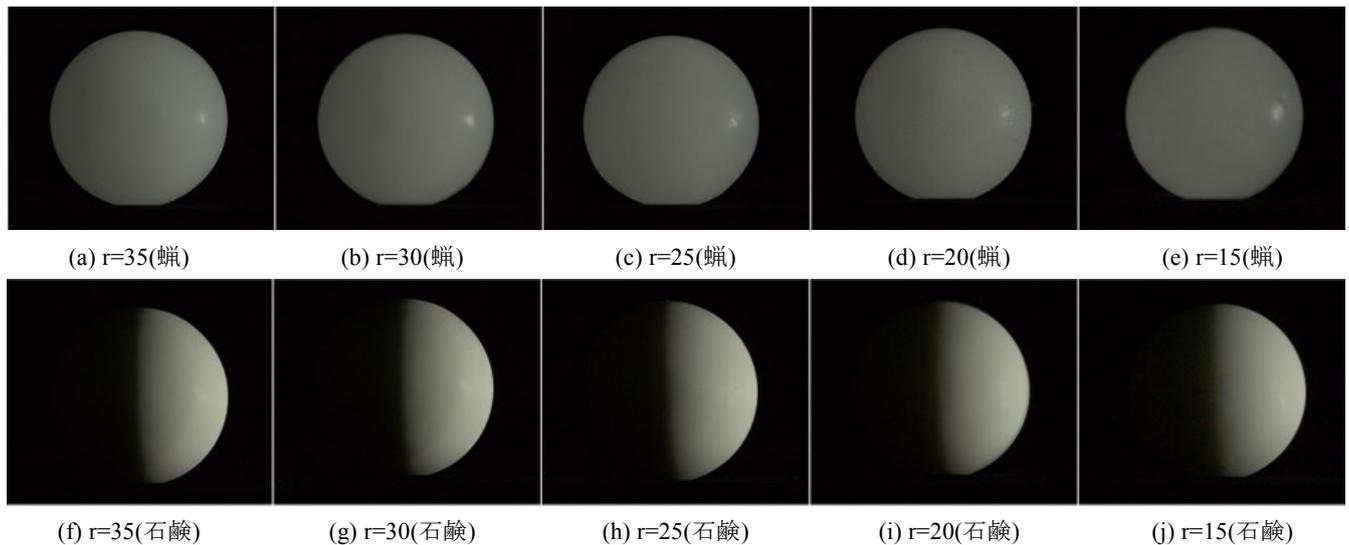


図3 撮影画像

ある様子が確認できる。さらに、 θ の値が等しい地点において、視点方向と法線方向の成す角 $\varphi(0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ)$ が大きくなるほど、輝度が減衰している。したがって、曲率と透過度合の関係を取得する際には、視点位置による輝度の変化を考慮する必要があるといえる。

3.2.2 曲率と透過度合の関係

撮影画像により取得した、各半径の球の輝度値と光源と法線の成す角 θ の関係を図4にそれぞれ示す。図に示される輝度値はRチャンネルのみを抜粋した値である。図3の撮影結果と同様に、曲率が大きい、つまり半径の小さい球の方が光を照射した際に光が透過しやすく、表面下散乱の影響を相対的に大きく受けていることが確認できる。逆に曲率が小さい、つまり半径の大きい球においては、表面下散乱の影響が相対的に小さくなり、Lambert則に基づく反射モデルに類似した結果となった。また、透明度の低い石鹸で作成した球の方が、曲率の変化に対して透過度合の変化が少ないといえる。

取得した輝度値分布は、視点位置による輝度の変化を考慮できていない。よって、視点方向と法線方向の成す角 $\varphi(0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ)$ による影響を実測する。取得した輝度値分布から視点位置による影響を取り除くために、 φ の変化と輝度値分布の関係をもとにして、 $\varphi=0^\circ$ における曲率と透過度合の関係に補正する。以下に詳細を示す。

3.2.3 視点位置による輝度変化

図3の撮影結果をもとに、視点位置が輝度値に与える影響を取得する。様々な曲率の半透明球上の $\theta=90^\circ$ における、 φ と輝度値の関係を図5にそれぞれ示す。図5より、 φ の値が増加するにつれて輝度値が減衰していることがわかる。つまり、球の法線と光源方向の関係が同じ条件であっても、法線ベクトルと視線ベクトルの成す角により輝度に変化が

生じることを確認できた。輝度の値が多く分散している部分も見受けられるが、半透明球のノイズなどによる測定誤差の影響であると考えられる。

取得した輝度値分布をもとに、輝度変化の割合を取得するため、フレネルの透過式に基づき近似関数を求める。フレネルの式は光が物体表面で反射、もしくは透過する割合を定式化したものであり、以下のように示される。ここで α は入射光の入射角、 β は屈折角を表し、屈折角は式(5)によって決まる。なお物体の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_2 とする。

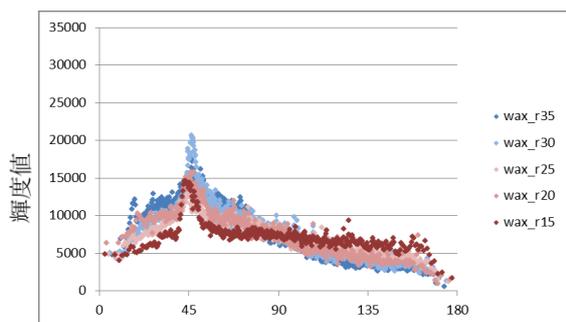
$$R = \frac{\left(\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}\right)^2 + \left(\frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)}\right)^2}{2} \quad (4)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

角度による輝度の減衰は曲率の大小にかかわらずほぼ同様であると考えられるため、それぞれ材質において有効であるデータの最大値で正規化を行い、物体の屈折率を未知として最小二乗法に基づきフィッティングを行った。なお、石鹸のデータに関しては、曲率が小さいものは輝度が小さくノイズの影響が多いため、 $r=15$ におけるデータのみを用いた。その結果、蝋の屈折率は1.54、石鹸の屈折率は1.56となった。推定した屈折率の値をもとに取得した近似関数を、合わせて図5に示す。

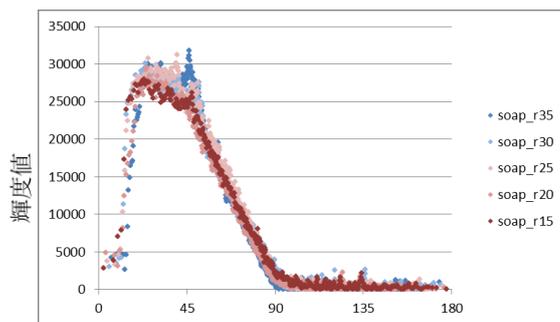
3.3 データの補正

前述したとおり、3.2.2節で取得した曲率と透過度合の関係は、視点位置による輝度変化を含めた結果になっている。したがって、3.2.3節で求めた半透明物体における輝度値の視点依存性による影響を用いてデータの補正を行うことで、すべてのデータを同じ視点位置から取得したとみなすこと



球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

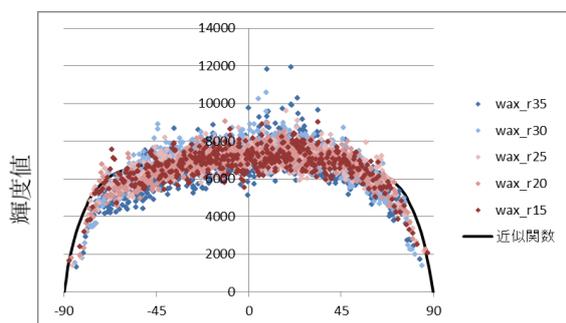
(a) 蝋(補正前)



球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

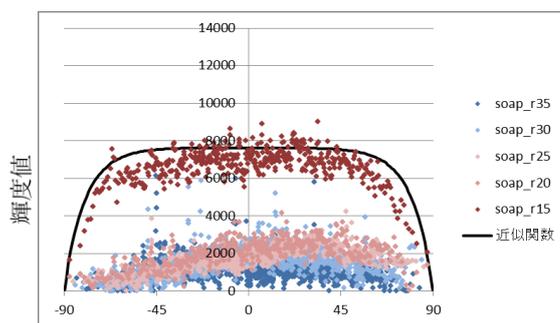
(b) 石鹸(補正前)

図4 輝度値分布(θ 方向・補正前)



球の法線と視点方向の成す角 ϕ [deg]

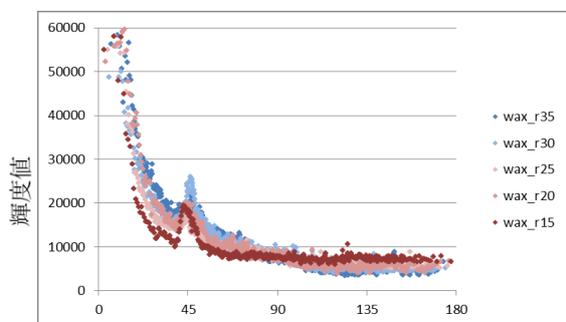
(a) 蝋



球の法線と視点方向の成す角 ϕ [deg]

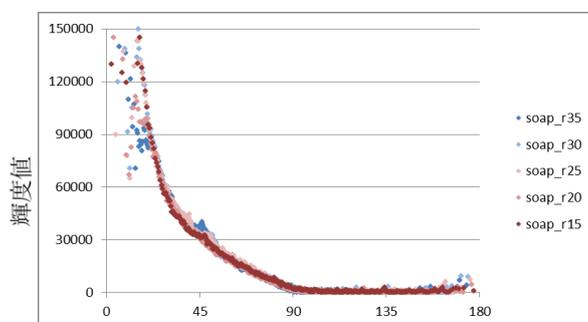
(b) 石鹸

図5 輝度値分布(ϕ 方向)



球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

(a) 蝋(補正後)



球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

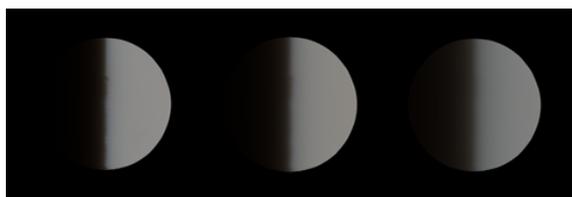
(b) 石鹸(補正後)

図6 輝度値分布(θ 方向・補正後)

が出来る. 実際に補正を行った結果を図6にそれぞれ示す. 補正を行う前は $\theta=45^\circ$ 付近で輝度値がピークを示していたが, 補正後の結果ではその点が改善されていることが分かる. この補正を加えることにより, 曲率と透過度合の関係を視点位置に依存することなく取得することが出来たといえる. 以上により, 5種類の半径の半透明球において, それぞれの撮影可能な領域内の曲率と透過度合の関係を取得することができた.

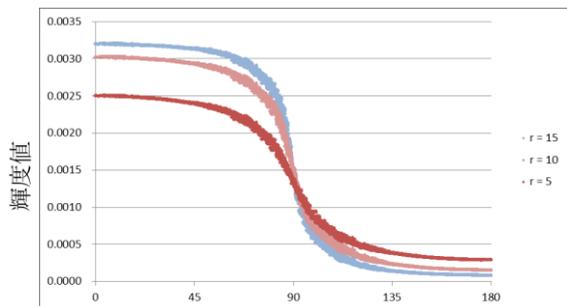
4. CDRFの有効性の検証

本章では, CDRFを用いた半透明物体の画像解析の有効性を検証するため, 様々な曲率の半透明物体における表面下散乱現象のシミュレーションを行う. まず, ダイポールモデルを用いて様々な曲率の球におけるシミュレーションを行い, 実測データと同様の結果を得られることを示す. 次に, 様々な曲率をもつ半透明物体においても同環境でシミュレーションを行い, 取得した輝度値分布から CDRF との



(a) $r=15$ (b) $r=10$ (c) $r=5$

図7 シミュレーション結果



球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

図8 輝度値分布

関連性について検証を行う。

4.1 環境

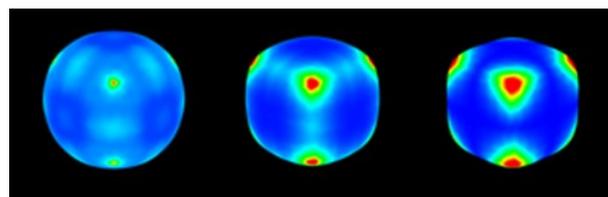
ダイポールモデルを仮定としてシミュレーションを行い、半透明物体のパラメータは大理石（散乱係数: R2.19, G2.62, B3.00, 吸収係数: R0.0021, G0.0041, B0.0071[mm⁻¹]^[3]を仮定した。光源は点光源を仮定し、光源から半透明物体までの距離は5.00[m]と設定した。点光源を物体から遠方に設定することで、ほぼ平行光源とみなすことができる。

以上の環境においてシミュレーションを行い、輝度値の取得を行う。頂点単位で輝度値の計算を行うため、視点位置から直接見えない箇所においてもデータを取得することが可能である。

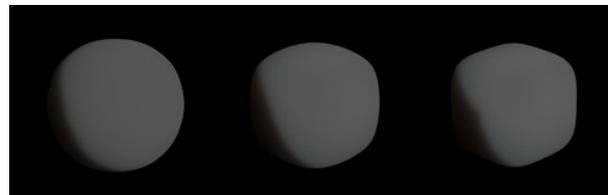
4.2 球体における輝度値の取得

4.1の環境において、半透明球の半径 r をそれぞれ 15, 10, 5[mm]としてシミュレーションを行った。描画結果を(a)から順に曲率が大きくなるよう図7にそれぞれ示す。なお、画像内の球見かけの大きさがそれぞれ等しくなるように調整を行った。

また、それぞれの球のシミュレーション結果から、球の法線と光源方向の成す角 θ における輝度値分布を取得した結果を図8に示す。図に示される輝度値はRチャンネルのみを抜粋した値である。このシミュレーション結果から、実測データと同様に、曲率が大きい球の方が、相対的に光が透過しやすいことが確認できる。4.3節において、同様の環境において検証を行う。

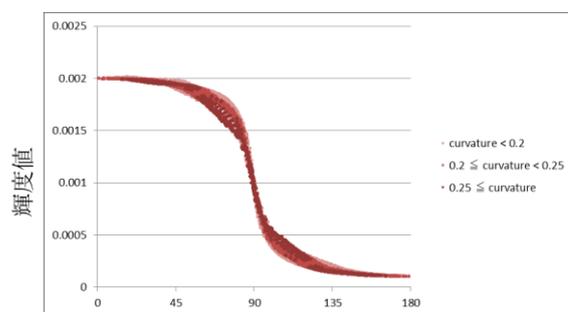


(a) 物体1(曲率) (b) 物体2(曲率) (c) 物体3(曲率)



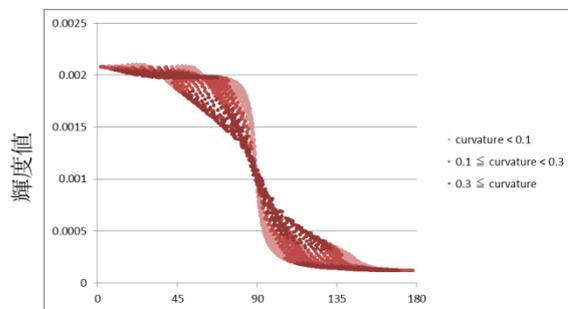
(d) 物体1 (e) 物体2 (f) 物体3

図9 曲率とシミュレーション結果



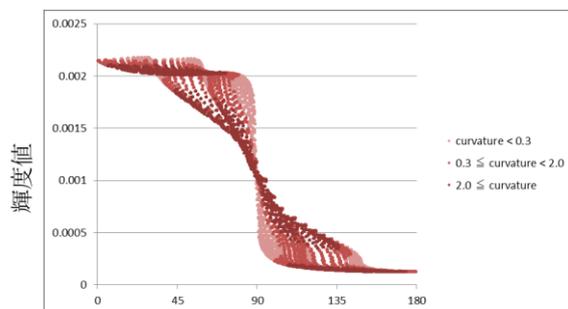
球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

(a) 物体1



球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

(b) 物体2



球の法線と光源方向の成す角 θ [deg]

(c) 物体3

図10 輝度値分布

4.3 様々な曲率をもつ物体における輝度値の取得

シミュレーションの対象物体として、今回3種類の形状を用意した。球に近いものから順に、曲率の値を可視化したものを図9(a)(b)(c)に示す。今回用いた曲率の種類はガウス曲率である。これらの物体における表面下散乱のシミュレーションを行い、それぞれの描画結果を図9(d)(e)(f)に合わせて示す。描画結果から、直接光が照射されていない領域に関しても、光が回り込み明るく照らされる様子が確認できる。

また、4.1節と同様に、物体の法線と光源方向の成す角 θ における輝度値分布を取得した結果を、図10にそれぞれ示す。曲率が大きい箇所は、立方体の角に該当する領域であり、曲率が小さくなるにつれて立方体の辺、面の領域に順に該当する。したがって、取得した輝度値分布を、曲率が大きい順に立方体の角、辺、面の3つにそれぞれ分類した。

図10から、物体1は形状が球に近いため、輝度値分布が乱れず4.2節に近い結果が得られていることがわかる。しかし、(b)(c)の結果より、物体2、物体3と、形状が球から離れるにつれ、輝度値分布に乱れが生じているといえる。輝度値分布を大まかにみると、曲率が大きい箇所の方が相対的に光が透過しやすい傾向であることが確認できる。また、曲率が小さい箇所では輝度値分布が複数の線上に分布していることが確認できる。これは、面は曲率がほぼ0であり、CDRFに基づいた反射モデルで近似することは困難であるためである。曲率が小さい箇所において、輝度値分布はそれぞれの面の法線、位置に大きく依存しているといえる。さらに、曲率が大きい箇所において、 θ の値が大きい、または小さい領域に関しては、輝度値が極端な値となることが見て取れる。これは、形状が球で近似しきれない範囲になり、光の透過度を CDRF に基づいた反射モデルで表現できなくなった結果だといえる。しかし、適切な θ の範囲においては、球以外の形状であっても、CDRF に基づいて反射モデルを定義できる。

以上により、極端に曲率が小さい場合や、平面に近い領域においては CDRF に基づく近似が困難であることが分かる。また、曲率の大きい箇所においては、物体の厚みの影響を受けるため、誤差が乗ってしまうことが分かる。しかし、取りうる曲率の値が一定の範囲に収まる場合、実測を用いた CDRF の近似が限りなくシミュレーションに近い結果を得ることが出来た。

5. まとめと今後の課題

本稿では、実測結果を基にして半透明球の透過度を曲率に関連付けた。さらに、シミュレーションを用いて様々な曲率をもつ形状における曲率近似手法の有効性について検討を行った。その結果、曲率が0に近い領域においては CDRF に基づく近似が困難であり、曲率の大きい箇所においては、厚みの影響を受け誤差が大きくなることが分かった。また、とりうる曲率が一定の範囲に収まる形状においては、CDRF を用いた近似が有効であるといえる。

今後の課題としては、CDRF での近似が有効な範囲の定量的な評価や、使用する曲率の種類の検討等が挙げられる。

参考文献

- 1) Jimenez, J., Sundstedt, V. and Gutierrez, D., "Screen-Space Perceptual Rendering of Human Skin", in ACM Trans. Appl. Percept. 6, 4, 1-15, 2009.
- 2) Donner, C. and Jensen, H. W., "Light diffusion in multi-layered translucent materials", in ACM SIGGRAPH'05, 2005.
- 3) H, Kubo., Y, Dobashi. and S, Morishima., "Curvature Dependent Reflectance Function for Rendering Translucent Materials", in ACM SIGGRAPH '10, 2010.
- 4) H, Kubo., Y, Dobashi. and S, Morishima., "Curvature-Dependent Reflectance Function for Interactive Rendering of Subsurface Scattering", IJVR'11, 10(1):41-47, 2011.
- 5) Blinn, J., "Light reflection function for simulation of clouds and dusty surfaces", in Proceedings of the 9th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'82, pp.21-19, 1982.
- 6) Hanrahan, P. and Krueger, W. "Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering", in Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'93, pp.165-174, 1993.
- 7) Stam, J. "Multiple Scattering as a Diffusion Process" in Eurographics Rendering Workshop, pp.41-50, 1995.
- 8) Jensen, H.W., Marshner, S. R., Levoy, M. and Hanrahan, P., "A Practical model for subsurface light transport", in Proceeding of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'01, pp.511-518, 2001.
- 9) Fernando, R.: GPU Gems: Programming techniques, Tips and tricks for Real-Time Graphics, Pearson Higher Education (2004).