

実計測による半透明物体の反射関数推定と リアルタイムレンダリング

岡本翠^{†1} 安達翔平^{†1} 宇梶弘晃^{†1} 岡見和樹^{†1} 森島繁生^{†2}

様々な CG コンテンツにおいて、半透明物体を写実的に表現することは重要である。本研究では、実測データをもとに曲率と光の透過度合を関連付け、半透明物体を高速に描画する手法を提案する。様々な半径の半透明球に光を照射し、球の法線と光源方向の成す角に対する輝度値の変化を実測する。さらに、球の法線と視点方向の成す角に対する輝度分布を分析することにより、半透明物体における光の指向性が与える影響を考察する。実測により得られたデータをもとに、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、高速かつ高品質な半透明物体の描画を実現する。

Estimation of Reflectance Function by Measuring Translucent Materials for Real-time Rendering

MIDORI OKAMOTO^{†1} SHOHEI ADACHI^{†1} HIROAKI UKAJI^{†1}
KAZUKI OKAMI^{†1} SHIGEO MORISHIMA^{†2}

It is important to render translucent materials realistically in computer graphics. In this paper, we propose a method of rendering translucent materials in real-time by actual measurement. First, we irradiate several translucent spheres of varying radii to measure actual subsurface scattering. Next, we acquire radiance and angle between normal and light vector on each point of the sphere. After that, we revise radiance by analyzing radiance and angle between normal and view vector. As a translucent material, we relate curvature and radiance. Finally, we can prepare fast and realistic rendering results of translucent materials.

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非常に多く存在する。しかし、厳密な半透明物体の描画を行うためには、物体に入射した光が物体内部に侵入し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ため、リアルタイムでの描画は困難である。よって、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、画像空間でのみ半透明の描画を行ったり^[1]、ぼかしたテクスチャを重ね合わせたりする^[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。

本稿では、実測データをもとに曲率と光の透過度合の関係を取得し、半透明物体を高速に描画する手法を提案する。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。以上により得られたデータを Look

Up Table : LUT に格納する。LUT とは、輝度値の変化などのテーブルを 2 次元テクスチャに格納したものである。実際に描画を行う際には 3D オブジェクトの曲率を事前計算し、作成した LUT を参照することで高速描画を行う。以上の手法により、実測に基づいた法線と輝度値の関係が取得できるため、従来手法よりも厳密な半透明物体の描画が可能となる。また、従来手法では考慮できていない、視点位置による輝度の変化も表現出来ているため、より写実的な表現が可能になる。

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。したがって、人間の肌や大理石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るため、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^[3]は、半透明物体を局所的に十分大きな平面と

^{†1} 早稲田大学
Waseda University

^{†2} 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

仮定することで、半透明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まだ程遠いといえる。Wrap Lighting^[4]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。半透明物体によくみられる光の回り込む現象の描画が可能であるが、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^[5]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)を提案した。半透明物体では、入射光は物体内部である広がりをもって散乱するため、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。

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

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

$$g(\theta_i, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(k)^2}} \exp\left\{-\frac{\theta_i^2}{2\pi(k)^2}\right\} f_r^c(\theta_i, 0)$$

曲率を物体表面の起伏を示す指標として導入することで、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、久保らは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い曲率と透過度合の関係を取得している。そのため、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。



(a) Monkey (b) Bunny

図1 CDRF による描画結果

3. 提案手法

本研究では、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。以上により得られた曲率と透過度合の関係をj用いて、欠落しているデータの補間を行い、LUT に格納する。描画を行う際には、前計算しておいた 3D オブジェクト各部の曲率をもとに LUT を参照することで、高速な描画が可能となる。さらに、LUT を参照した値に対して、実測により得た ϕ に対する輝度値分布を考慮した補正を加えることで、光の指向性と視点方向による輝度変化を考慮した、より高品質な半透明物体の描画が可能となる。

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。蠟(パラフィン 135°F)を用いて作成した半透明球に対し、平行光を照射し真横から撮影を行う。光源から半透明球までの距離は約 35[cm]、カメラのレンズから半透明物体の中心までの距離は 30[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。環境光の影響を軽減するため、平行光を球のみに照射するよう調整し、周囲を黒い箱で覆った。また、半透明球における鏡面反射成分を取り除くため、カメラのレンズに円偏光フィルターを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はそれぞれ 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20, 15[mm]とした。

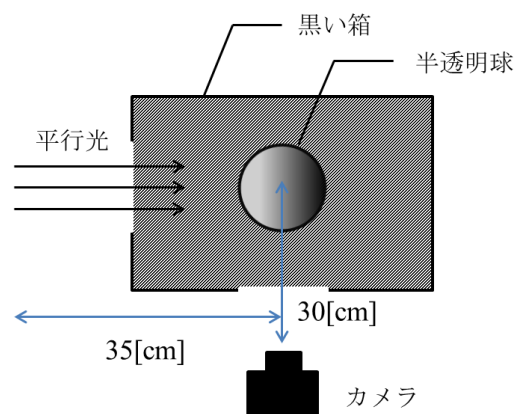


図2 撮影環境

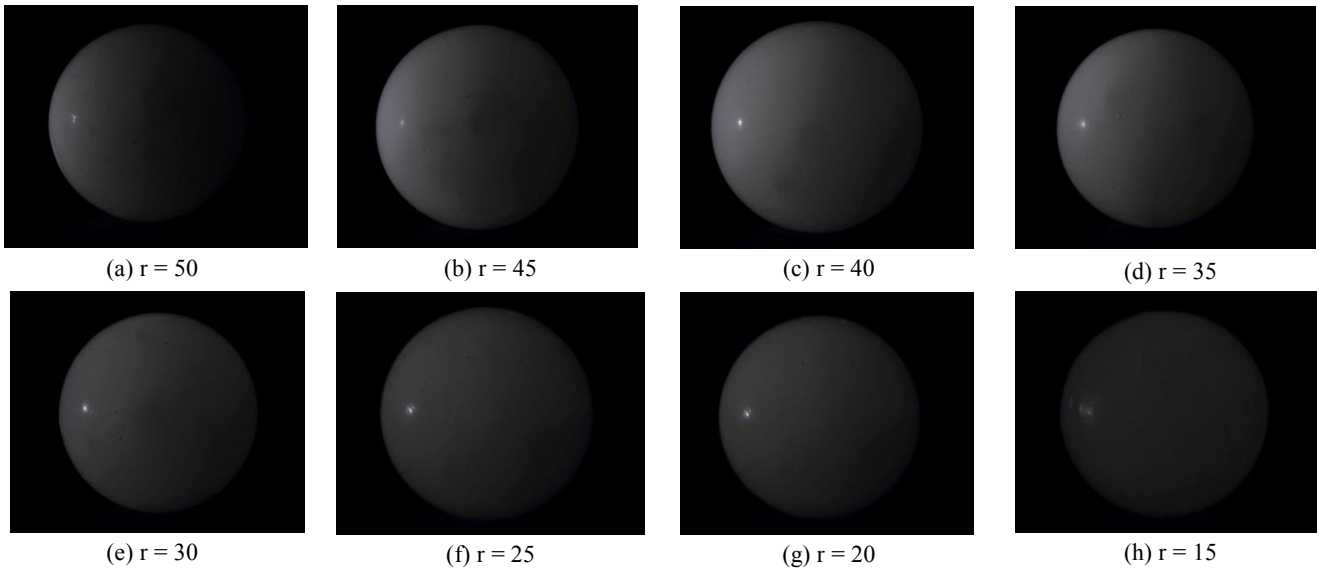


図3 撮影画像

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)から順に曲率が大きくなるよう図3に示す。なお、比較の簡易化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領域である $\theta > 90^\circ$ 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))に対し、曲率が大きい球(図3-(h))は照射光がより透過していることが確認できる。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。

撮影を行う際に近距離から画像を取得しているため、球の端に該当する領域においてはデータを取得できない。それぞれの球ごとに、実際に輝度の取得が可能である範囲の分析を行う。撮影環境を図5に示す。半透明球とカメラの位置条件を図2と同様に設定し、半透明球の背後13[cm]の地点に方眼紙を置く。図5の撮影環境において撮影を行い、撮影画像における球の直径 α [cm]とカメラレンズの画角を用いて撮影が不可能な角度 β を算出する。それぞれの球における α 、 β の値を表1に示す。また、このとき実際に輝度の取得が可能である角度領域は以下のように示される。

$$\beta \leq \theta \leq 180^\circ - \beta \quad (2)$$

なお、カメラのフレームサイズは 23.4[mm]×16.7[mm]であり、カメラレンズの焦点距離は 34.0[mm]である。データが欠落している $0^\circ \leq \theta \leq \beta$, $180^\circ - \beta \leq \theta \leq 180^\circ$ の範囲に該当する部分の補間方法等については 3.4 節で詳述する。

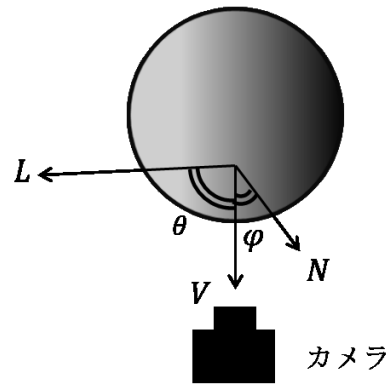


図4 角度

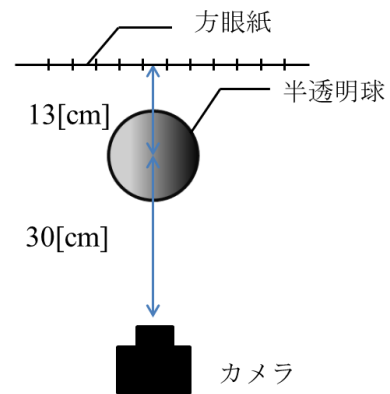


図5 輝度値の取得位置と撮影環境

表1 パラメータ

	半径 [mm]							
	50	45	40	35	30	25	20	15
α [cm]	13.3	12.3	11.0	9.53	8.15	6.62	5.45	3.92
β [deg]	8.79	8.14	7.29	6.32	5.41	4.40	3.63	2.61

3.2.2 曲率と透過度合の関係

撮影画像により取得した、各曲率の球の輝度値と光源と法線の成す角 θ の関係を図6に示す。図に示される輝度値はR,G,Bチャンネルを平均したグレースケール値である。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。

取得した輝度値分布は、半透明物体における表面下散乱成分と拡散反射成分が混合している。そのため、物体表面における反射光の影響を受け、輝度値のピークが 30° 付近に観測できる。実際に検証を行った結果、視点方向と法線方向の成す角 φ ($0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$)の大きさにより輝度が変化することが確認できた。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。

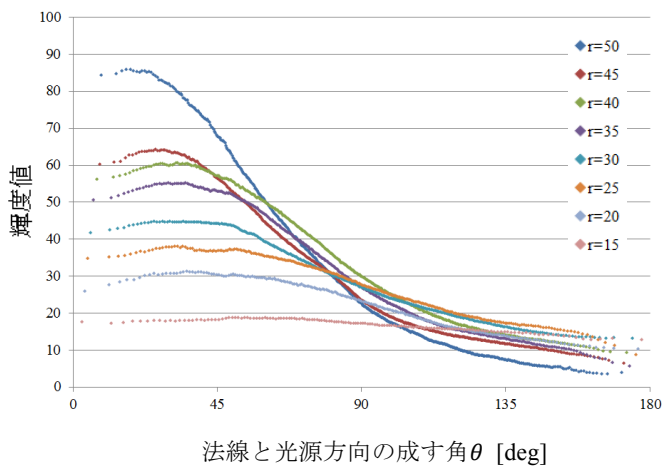


図6 輝度値分布(θ 方向)

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7に示す。図7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。輝度の大小関係が前後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。また、今回環境光の影響が大きいと考えられる $r=15$ におけるデータは除外した。取得した輝度値分布をもとに輝度変化の割合を比較するため、それぞれの曲率における輝度値の最大値が1となるよう正規化

を行った結果を図8に示す。図8の結果により、角度による輝度の減衰は曲率の大小に関わらずほぼ同様であると考えられるため、式(1)に示すガウス関数を用いて一律にフィッティングを行った。

$$y = a + \exp\left(-\frac{x^2}{c^2}\right) \quad (3)$$

フィッティングにより得られたパラメータは、 $a = 0$ 、 $c = 93.32$ であった。ガウス関数によるフィッティング結果を図8に示す。

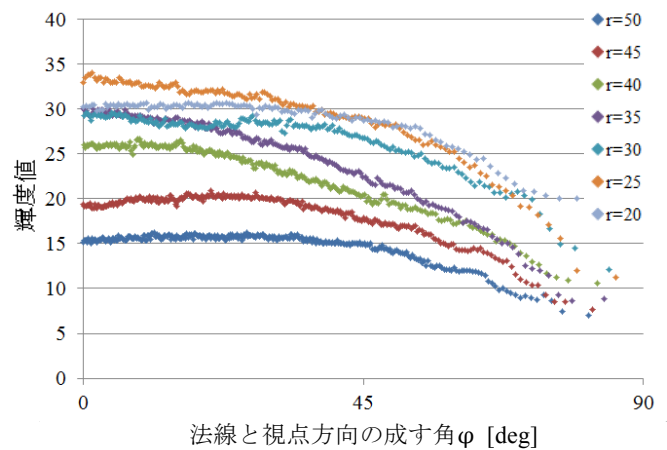


図7 輝度値分布(φ 方向)

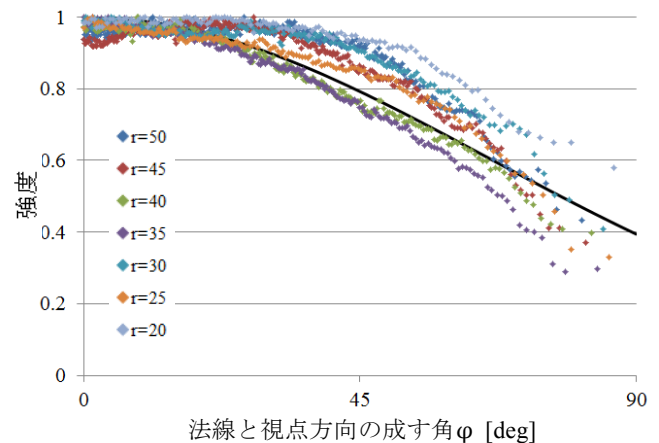


図8 関数近似結果

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が出来る。輝度値の補正を行う前と、光の指向性による輝度の減衰を近似した関数を用いて補正を行った後の比較結

果の一例($r=35$)を図 9 に示す. 補正を行う前は $\theta=30^\circ$ 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. また, すべての曲率において補正を加えたものを図 10 に示す. 以上により, 8 種類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.

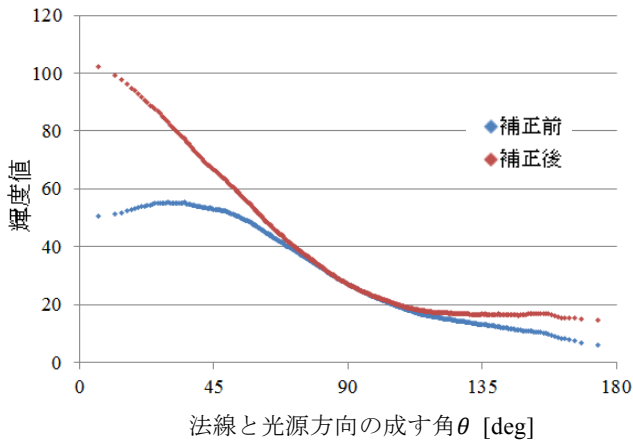


図 9 補正前後の比較結果の例 ($r = 35$)

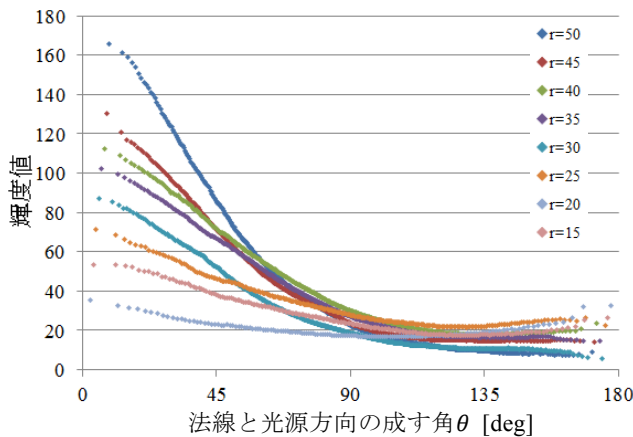


図 10 輝度値分布(補正後)

3.4 データの補間

撮影により取得できなかった $0^\circ \leq \theta \leq \beta$, $180^\circ - \beta \leq \theta \leq 180^\circ$ の領域におけるデータに対し, 角度方向に Catmull-Rom Spline 補間を行う. この補間結果により $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ におけるデータが得られる. 補間結果の例として, $r=25$ における Catmull-Rom Spline 補間の結果を図 11 に示す. また, 全ての球における補間後の輝度値分布を図 12 に示す.

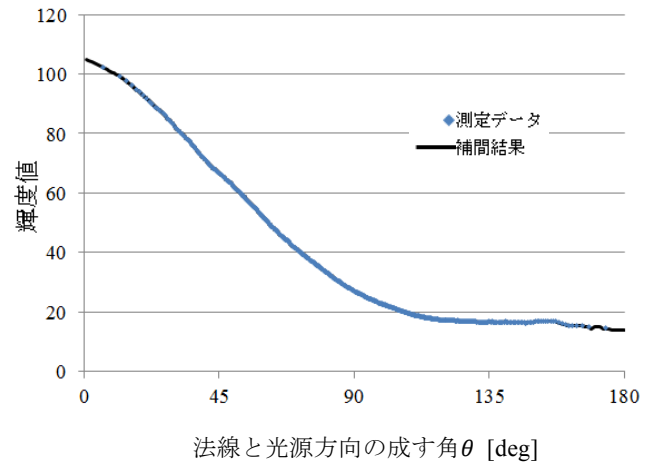


図 11 補間前後の比較結果の例 ($r = 35$)

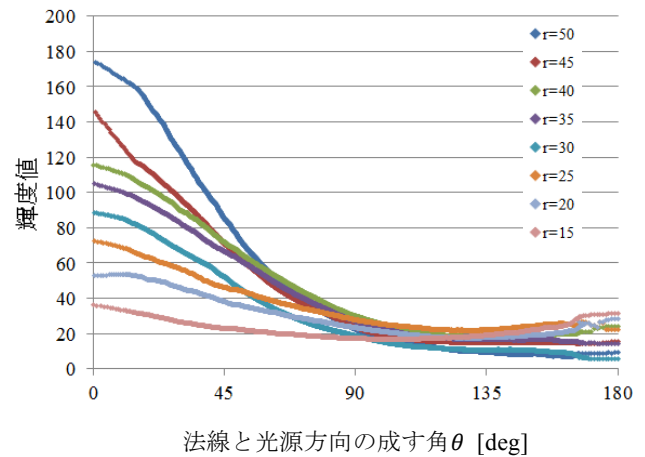


図 12 輝度値分布(補間後)

3.5 LUT の作成

3.3 節で取得したデータを用いて LUT の作成を行う. 取得したデータは曲率方向に離散的であるため, 様々な曲率における輝度値データの推定を行う必要がある. 今回は実測した 8 つのデータをもとに Catmull-Rom Spline 補間を行うことにより, 曲率方向に補間を行った. 以上を基に作成した LUT の結果を図 13 に示す. 図 13 において縦軸は曲率 κ , 横軸は光源と法線方向の成す角 θ を示す. 提案手法における変域は, $0 \leq \kappa \leq 0.07$, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ である. 提案手法では, 既存手法における LUT 上の曲率が大きい領域において, θ の増大に従い輝度値が明るくなるなどの不自然な部分が解消されている. また, 少数の取得データのみでも, 半透明物体の高品質な描画に必要な LUT を作成することが可能であることがわかる.

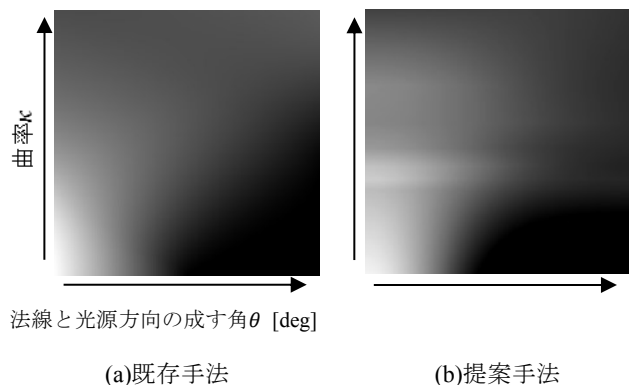
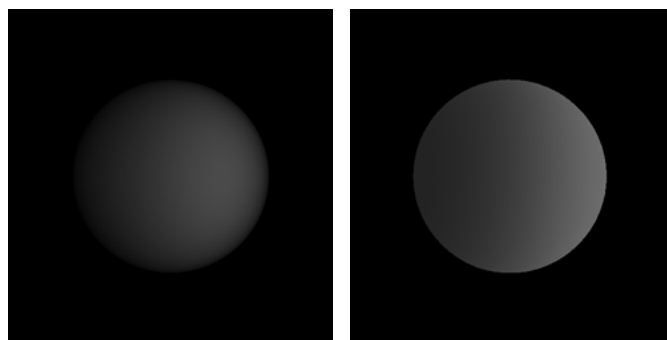


図 13 LUT の比較結果

3.6 視点位置による輝度減衰

LUT を参照した値に対し, 3.2.3 節で得られた視点位置による輝度の減衰を考慮する. 実際に, 作成した LUT (図 13-(b)) を参照し, 物体の法線ベクトルと視点ベクトルをもとに輝度減衰をかけたものと, LUT 参照のみによるものとを比較結果を図 14 に示す. 描画の際にテクスチャ参照だけでなく, 視点位置を考慮することで, ϕ が大きい部分に関しては暗くなり, より半透明らしいやわらかい陰影が表現できることがいえる.



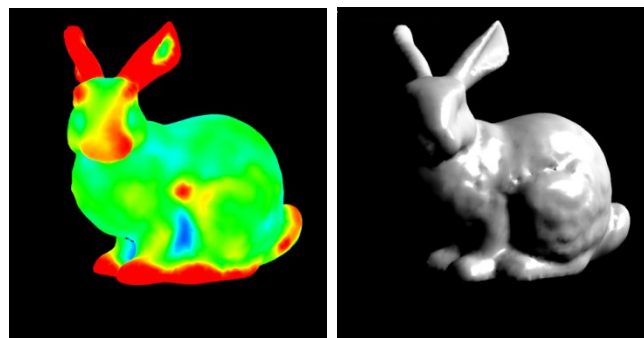
(a)輝度減衰あり (b)輝度減衰なし

図 14 輝度減衰の比較

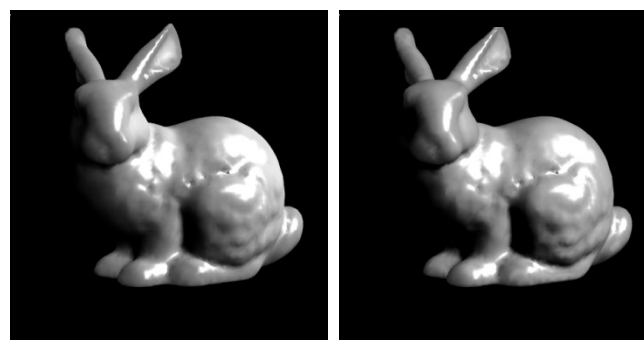
4. 結果

曲率計算を行った結果と, ランバートモデル, 既存手法と提案手法を用いて半透明物体をそれぞれ描画し比較した結果を図 15 に示す. また, それぞれの描画結果の拡大図を図 16 に示す. 同じ方向から光を照射した際に, $\theta > 90^\circ$ の部分において, ランバートモデルは輝度値が 0 であることにに対し, 本手法では透過光の影響が描画されており, 半透明物体らしい描画結果となっていることがわかる. また曲率が大きい耳などの部分において, 他箇所比べ光が透過しやすく明るく描画されていることがわかる.

また, 既存手法に対し提案手法では物体の法線と視点ベクトルの成す角が大きくなるほど暗く描画されており, 視点位置により輝度値が変化する表現が可能となった.

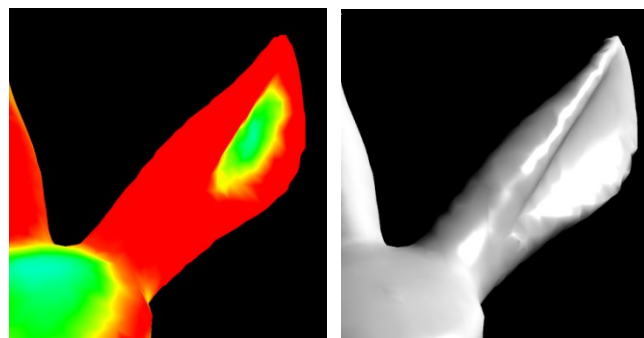


(a)曲率 (b)ランバートモデル

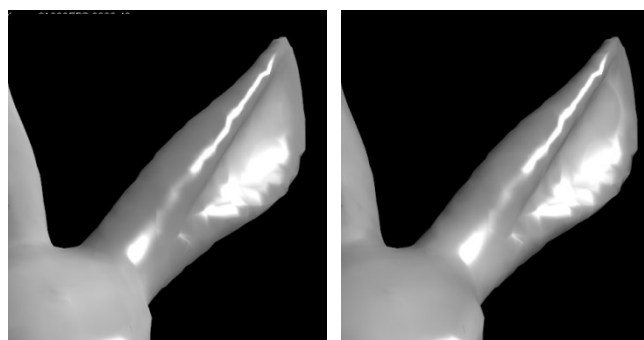


(c)既存手法 (d)提案手法

図 15 描画結果



(a)曲率 (b)ランバートモデル



(c)既存手法 (d)提案手法

図 16 描画結果(拡大図)

なお動作環境として, CPU: Intel® Core™ i7-3770 3.4GHz, DirectX 9.0c, GPU: NVIDIA® GeForce® GT 640 を用いた. 既存手法と同様に LUT を参照することで物体の輝度値を

取得するため、計算時間に関しては、ほぼ同等の計算負荷での描画が可能であり、リアルタイムで処理を行うことができる。

5. まとめ

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、半透明物体における視点位置による輝度変化を考慮することで、半透明物体の高品質かつ高速な描画を可能とした。

今後の課題としては、視点の位置に応じた輝度変化の近似関数の検討、曲率のリアルタイムでの計算、LUT作成における補間方法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) 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.
- 4) Felnando, R.: GPU Gems: Programming techniques, Tips and tricks for Real-Time Graphics, Pearson Higher Education (2004).
- 5) H, Kubo. et al., "Curvature Dependent Reflectance Function for Rendering Translucent Materials", SIGGRAPH '10, 2010.