

厚さに依存しない半透明物体の透過率計測に関する検討

村松 祐渡^{1,a)} 日浦 慎作^{1,b)}

概要: 半透明物体の見かけの透明度は、その物体を構成する素材の光透過率が同じであっても、物体の厚さや形状によって変化する。本研究では半透明物体にプロジェクタからスリット状の光を投影し、その光の広がり方から物体の透過率を推定する方法を提案する。提案手法では、同一の素材で厚さの異なる様々な物体に対しスリット状の光の滲み具合を測定し、各物体の透過率、厚さと滲み幅の関係をモデル化する。このモデルを用い、対象物体の素材の光透過率を推定することができた。

1. はじめに

工業製品や農産品等の高付加価値化には、強度や耐久性、栄養価など機能面の高度化だけでなく、統一感や審美性など外観の管理が重要である。図 1,2 に透明感のないモデルと透明感を付与したモデルの CG 画像を示す。このように透明感の違いはものの質感や審美性に大きな影響を与える。例えば歯科インプラントでは機能面で差異がなくても、保険適用外となるがより本物の歯に近い外観の商品が敢えて選択される場合が多い。しかし、色度や光沢感等の定量化に比べ、透明度・透明感の計測に関する研究は乏しく、現場では専門家の勘や現物合わせで選択・発注が行われているのが現状である。そこで本研究では対象を構成する素材の光透過率を、物体の表側のみから非破壊的に計測する手法について検討する。



図 1 透明感のないモデル 図 2 透明感を付与したモデル

2. 表面下散乱の特性と計測

本研究では、対象物体の透過率を対象物体の手前側からの照明および撮影により計測する。半透明の物体に入射した光は内部で散乱を生じ、その度合いは物体の透過率と形

状に関する。そこでこの章では物体内部における光の散乱現象（表面下散乱）と、見かけの透明感の関係について述べる。

2.1 表面下散乱と見かけの透明感の関係

物体の見かけの透明感、素材の光透過率だけでなく、対象の形状や厚みによっても変化する。図 3 は同じ素材で作られた物体であるが、左が厚さ 18mm、右が厚さ 2mm となっているため、右の物体のほうが透過率の高い（透明度の高い）素材で作られているように見える。これは、物体内部で散乱する光の一部が物体を通過し、反射する光が減少するからである。図 4 に示すように、物体に入射した光は物体の表面近くのみを伝播するとは限らず、物体の奥深くを通過する場合もある。しかし物体の厚みが薄くなると、物体の内部へと進んだ光は裏面から射出され、その光は物体

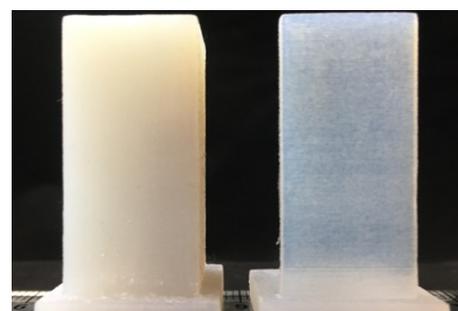


図 3 厚みによる透明度の違い

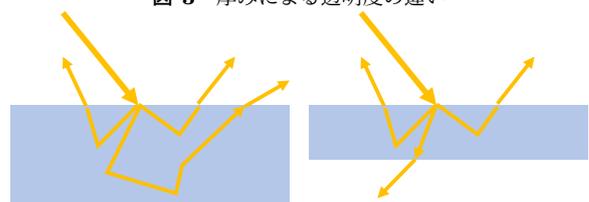


図 4 厚みの違いによる見かけの変化

¹ 兵庫県立大学

^{a)} monza.0502@icloud.com

^{b)} hiura@eng.u-hyogo.ac.jp

の表面側へ戻ってくることはない。そのため、図3の右に示すような厚みの薄い物体は見かけの輝度や、光の滲みの幅が低下する。

我々人間の視覚は過去の実験等からこれを正しく認識することもあるが、場合によってはより透過率が高い物体のように誤認識することがある。カメラと計算機を用いた計測においても同様に、厚みによる表面下散乱の変化を補正しなければ、正しい透過率を求めることは出来ない。そこで本研究では対象の厚みと投影光の滲み幅の関係について計測とモデル化を行い、厚さに依存しない透明度の測定方法を検討する。

2.2 表面下散乱

表面下散乱 (subsurface scattering) は、物体表面に入射した光が物体内部に潜り込み、内部で複数回反射を繰り返したのちに、光が入射した位置とは異なった位置から物体外部に出て行く現象である。これによって、光源により照らされていない領域が明るく見える。

表面下散乱は、単一散乱 (single scattering) と、多重散乱 (multiple scattering) に分けられる。単一散乱は図5のように、物体内部に入った光が、内部で一度だけ反射して物体外部に出て行く現象である。一方、多重散乱は図6のように、入射光が物体内部で何度も反射を繰り返すことによって生じる散乱である。この散乱は、散乱を繰り返すことで、あらゆる方向に同じ強度で散乱するディフュージョンを起こす [4]。

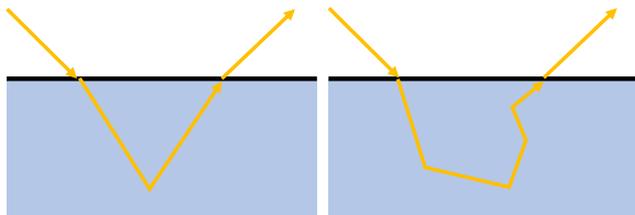


図5 単一散乱の図

図6 多重散乱の図

これらの表面下散乱の解析は盛んに行われている。JensenらはBSSRDFに基づいて、表面下散乱のライトトランスポートのモデルを作成した [2]。GoeseleらはレーザーとHDRカメラを用いて、物体の表面の各点で滲みの様子を捉え、半透明物体の計測を行った [1]。このように、特殊な照明で撮影を行っているものや、一般照明下で撮影された画像をもとに、解析した方法 [3] も提案されている。これらの研究では、形状が固定されたものを取り扱っている。

これらの散乱現象を数理的にモデル化し、それに基づき物体の透過率を求める方法が考えられるが、モデルの精度やパラメータの推定、計算量などの点で課題がある。そこで本研究では、素材の光透過率と厚みを様々に変えた物体の計測結果から、透過率と厚み、光の滲みの関係をモデル

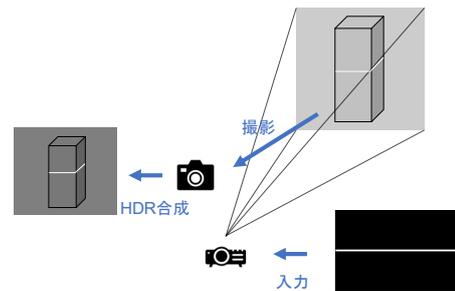


図7 画像取得の流れ

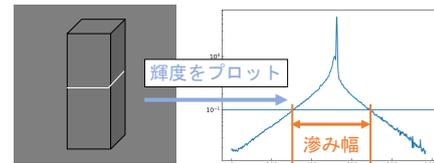


図8 滲み幅の取り方

化する。

3. 半透明物体におけるスリット光の滲み幅の測定

この章ではスリット光の投影に基づく透過率の推定方法について述べる。プロジェクタに幅が1ピクセルの直線状のパターンを入力し、スリット状の光を対象物体の表面に投影する (図7)。その反射光をカメラで撮影するが、明部と暗部の輝度差が大きいため、露出値を変化させながら多数の画像を入力し、HDR (High Dynamic Range) 合成を行う。

3.1 HDR(High Dynamic Range) 合成

本実験は、暗室環境で行う。一般に、表面下散乱光の輝度は非常に低い。しかし、プロジェクタからの投影光が直接照射されている部分は非常に明るくなり、一般の8bitカメラで撮影できる輝度値の範囲である0から255まででは輝度を表現しきれない。そこで本研究ではHDR合成を用いた。HDR合成ではカメラの露光時間を変化させ、撮影される写真全体の輝度の範囲を拡大する。具体的には露光時間を変えて、全体の明るさが異なる写真を複数枚撮影する。これらの写真について、各ピクセルの輝度値の重み付き平均により一枚の画像を得る。HDR画像を用いることで、より広い範囲の輝度を表現することができ、暗い場所から明るい場所までノイズに影響されにくい測定値を得ることができる。

3.2 光の滲み幅の定量化

HDR合成により得られた画像について、スリット光と直交する方向に輝度値を抽出する。つぎに輝度値が基準値を超える範囲の幅を求め、これを滲み幅とする。これを図8に示す。これらの撮影とプロットを様々な透明度、厚みに

ついて測定する。輝度の基準値には、投影光が直接当たっておらず、輝度が低すぎるときのノイズの影響を受けない値を設定する。

4. 実験

図9に示すように、図左の白い物体の位置に散乱物体を置き、プロジェクタから画像を出力しその様子をカメラで撮影する。ただし、実際の撮影では、部屋の電灯を消灯して行う。

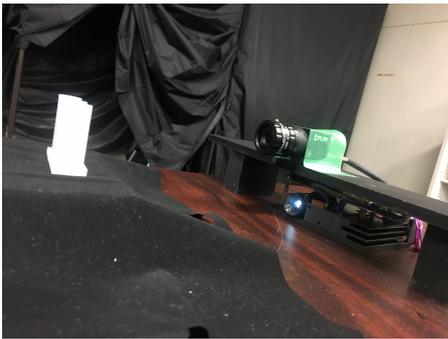


図9 実験環境

4.1 四角柱状の物体を用いた実験

横幅を15mmに固定し、厚みを40mm, 30mm, 20mm, 15mm, 10mm, 5mm, 4mm, 3mm, 2mm, 透明度を3種類に変化させた物体をマルチマテリアル3Dプリンタ(Stratasys Objet260 connex3)を用いて作成した。その物体の外観を図10に示す。これらの物体に対し前述の方法で撮影を行い、滲み幅を計測した。滲み幅を計測する場所は、図11の青線で示したように、物体表面のうち幅の中心付近とした。



図10 四角柱の散乱物体



図11 滲み幅を計測する位置

画像から求められた滲み幅と、物体の暑さ、素材の透明度の関係を図12に示す。図12より、厚みが小さくなると、滲み幅は減少していることがわかるさらに、厚みが20mmを超えてくると、滲み幅は大きく変化しないことがわかる。これらの実験により、物体が薄くなると滲み幅が小さくなるという仮説は裏付けられた。

しかし、測定点の少なさから、滲み幅の変化を細かく読み取りづらいこと、また3Dプリンタを用いた散乱物体の

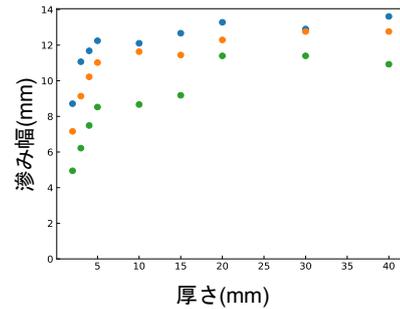


図12 滲み幅の変化

場合、素材の透明度に対応する物理量がなく定量化しづらいという問題があった。

4.2 乳白色の液体を用いた実験

より多くの測定点を確保するために、3Dプリンタで図13のような透明な楔形的水槽を作成した。この水槽に光の散乱が発生する液体を入れる。測定対象の液体には、白の絵の具を溶かした水を使用し、絵の具の割合(質量パーセント濃度)により透過率を定量化した。

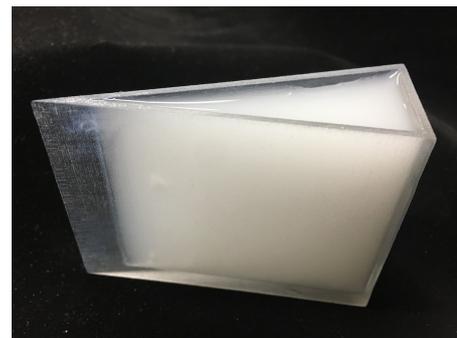


図13 楔型の水槽と半透明の液体

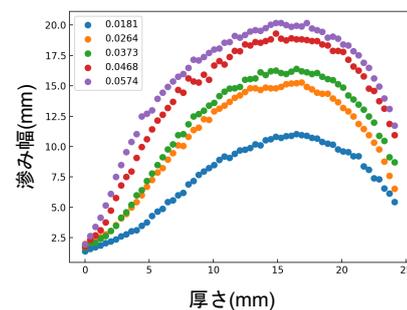


図14 水槽を用いて計測した、厚さと滲み幅の関係

撮影した画像から、輝度をプロットして滲み幅を求めた。その結果を図14に示す。図14より、滲み幅は、厚みが小さくなると急激に小さくなっていき、厚みが0に近づくとプロジェクタのスリット幅に起因する一定幅に収束することがわかる。また、厚みが15mmを超えてくると、いずれの濃度でも光の滲み幅が再び減少している。4.1節で示し

た四角柱を用いたでは、散乱物体の厚みが大きくなっても、滲みの幅が減少する現象は見られなかった。この原因は特定できていないが、楔形の水槽の寸法が限られていることから、端部の影響を受けたものと考えられる。

4.3 透過率・厚みと滲み幅の関係のモデル化と透過率推定

前節の結果に対し、白色顔料の質量パーセント濃度と対象物体の厚み、滲み幅の関係に多項式を当てはめることでモデル化を行った。このモデル式では、光の滲み幅を散乱物体の厚さ、顔料の濃度の二変数で表すこととした。

透過率の推定実験のため、図 15,16 のような厚さ 5mm, 幅 30mm の容器と、厚さ 8mm, 幅 30mm の容器を前述の 3D プリンタで作成した。これらの容器に質量パーセント濃度 0.0213%, 0.0355%, 0.0529% の白の絵の具を溶かした水を入れ、撮影を行い、その画像から滲み幅を測定した。滲み幅を測定する位置は、図 17 の青線で示すように物体の中心付近とした。

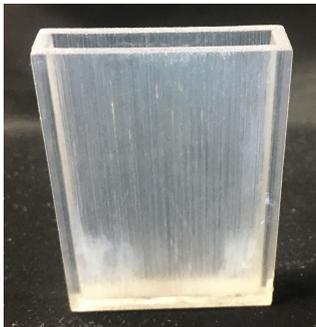


図 15 厚さ 5mm の容器

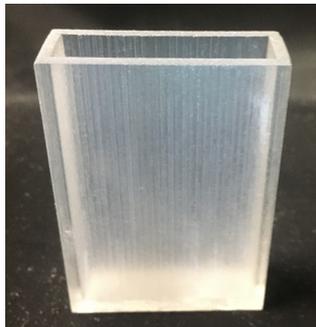


図 16 厚さ 8mm の容器

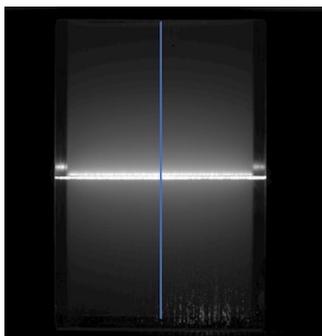


図 17 輝度プロットの目安

測定結果から求めた滲み幅の実測値と、モデル式に濃度と厚みを代入して得た滲み幅の推定値とを比較し、誤差を求めた。その結果を表 1 に示す。

表 1 より、滲み幅の推定値の誤差は実測値に対し 10% 程度もしくはそれより低い値となり、良好に推定できたと言える。前述のように楔形的水槽では両端の影響があるため、これによる誤差が主要因と考えられる。また逆に、物体の厚さを既知としたときの白絵の具の濃度を推定することも出来た。

表 1 誤差率測定結果

厚み (mm)	濃度 (%)	実測値 (mm)	推定値 (mm)	誤差 (mm)	誤差率 (%)	推定濃度 (%)
5	0.0213	6.85	6.05	0.80	11.7	0.0246
	0.0355	9.60	8.65	0.95	9.89	0.0428
	0.0529	12.4	11.3	1.11	8.95	0.0574
8	0.0213	9.79	9.79	0.00	0.00	0.0213
	0.0355	12.9	13.3	-0.4	-3.1	0.0334
	0.0529	15.1	16.5	-1.4	-9.2	0.0459

5. おわりに

本研究では対象物体に照射したスリット光の滲み幅を測定することで、散乱物体の厚み、透明度と滲み幅の関係について調べ、モデル化を行った。3D プリンタで作成した散乱物体を用いた実験から、滲み幅は厚みが小さくなると急激に小さくなるという仮説を裏付けることができた。またこのモデルにより、滲み幅と透明度、厚みの関係式が得られ、そこから滲み幅または透明度を推定することが出来た。厚みが大きい部分に関する計測精度の改善と、厚みや形状が未知の物体に対する透明度の推定が今後の課題である。

参考文献

- [1] Goesele, M., Lensch, H. P., Lang, J., Fuchs, C. and Seidel, H.-P.: Disco: acquisition of translucent objects, *ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pp. 835–844 (2004).
- [2] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M. and Hanrahan, P.: A practical model for subsurface light transport, *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 511–518 (2001).
- [3] Mukaigawa, Y., Suzuki, K. and Yagi, Y.: Analysis of subsurface scattering based on dipole approximation, *IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 1, pp. 128–138 (2009).
- [4] van Rossum, M. v. and Nieuwenhuizen, T. M.: Multiple scattering of classical waves: microscopy, mesoscopy, and diffusion, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 71, No. 1, p. 313 (1999).