

# 光学特性の異なる液体の混合による半透明物体の散乱特性再現

伏下 晋<sup>†</sup> 久保 尋之<sup>†</sup> 船富 卓哉<sup>†</sup> 向川 康博<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地-5

E-mail: <sup>†</sup> {fushishita.shin.fh0, hkubo, funatomi, mukaigawa}@is.naist.jp

**あらまし** 本研究では半透明物体の散乱特性の再現を目的とし、複数の異なる光学特性の液体を物理的に混合することにより対象物の見た目を再現するレプリカの作成に取り組む。散乱特性と液体の混合比率との関係を計測し、その関係に基づいてモデル化を行うことで、所望の散乱特性を再現可能な混合比率を求める。さらに、推定した比率に応じて、レプリカの作成を行い、散乱特性の再現を行う。実験を通じて、提案したモデルの推定精度を評価し、いくつかの異なる散乱特性の半透明物体の再現を行ない、本手法の有効性について示す。

**キーワード** デジタルファブリケーション、半透明物体、散乱特性、サンプリングベース

## Reproducing Scattering Property of Translucent Objects by Mixing Liquids of Different Optical Properties

Shin FUSHISHITA<sup>†</sup> Hiroyuki KUBO<sup>†</sup> Takuya FUNATOMI<sup>†</sup> and Yasuhiro MUKAIGAWA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

8916-5 Takayama-cho, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {fushishita.shin.fh0, hkubo, funatomi, mukaigawa}@is.naist.jp

**Abstract** In this research, we work on the fabrication of replica focusing on the reproduction of scattering properties of translucent objects. We propose reproduction of scattering property by mixing different optically liquids physically. We find a relationship between the mixture ratio and scattering property of mixed liquid by observation. According to the relationship, we attempt to estimate optimal mixture ratio for reproduction of given translucent objects. Finally, we evaluate the accuracy of the estimation and reproduced some translucent objects in experiments.

**Keyword** Digital Fabrication, Translucent Object, Scattering Property, Sampling base

### 1. はじめに

コンピュータグラフィクス分野ではリアルな CG を表現するために、物体の見え方に関する光学特性の研究に注目が集まっている。例えば、人の肌や大理石などで見られる半透明感の表現は、光の散乱特性を考慮することによって、フォトリアルな表現が可能である。一方で、CG だけでなく、実際の物体において半透明感を再現することにも社会的な要請があると考えられる。例えば、リアルな食品サンプルの作成は売り上げに大きく貢献するほか、装着する人の肌の半透明感の再現がなされた装飾義肢による医療分野への貢献などが挙げられる。

半透明物体の散乱特性の再現に焦点を当てた関連研究として、Hašan ら[1]や Dong ら[2]は散乱特性を複数のマテリアルの層構造によって再現した。使用するマテリアルと再現したい形状に基づいて、場所ごとに厚みや重ねる順番等を最適化することで所望の散乱特性を再現した。以上の研究はマテリアルの厚みや形を

自由に制御できる 3D プリンタのような機械が必要である。Papapoplos ら[3]は顔料を用いて半透明物体の色と散乱特性の再現をした。所望の散乱特性と色の再現が可能な顔料の組み合わせと混合比率を推定した。しかし、色の再現も同時に行なっているため、散乱特性の再現には限りがある。また、従来研究[2][3]は制約のある複雑な物理モデルに基づいた再現を行なっているため、計算量が大きくなる。加えて、いずれの従来研究[1][2][3]も光学的に濃い等方的な散乱を起こす物体の再現に焦点が当てられている。

そこで本研究では、光学特性の異なる液体の混合による散乱特性の再現方法を提案する。また、再現においては従来の物理モデルを使用せず、観測に基づいたモデル化を行う。これによって、従来よりも計算量は小さく、簡易な定量化とモデル化による再現を行う。また、モデルにおいては非等方性を考慮することで、従来のような光学的に濃い物体だけでなく、薄めの物体の再現を行う。

## 2. 液体の散乱特性

### 2.1. 半透明物体の散乱特性

半透明物体では表面下散乱と呼ばれる現象が起こる。これは入射した光が物体内部にまで侵入し、周囲へ伝播する現象であり、物体の内部で主に散乱と吸収が生じている。散乱は入射光が媒体内の粒子へ衝突することによって、様々な方向に光路が変化する現象である。散乱による放射輝度 $L_s$ の変化は位置 $p$ から $\omega$ 方向の光の強さ $L(p, \omega)$ 、散乱の強さを表す散乱係数 $\sigma_s$ 、微小な距離 $ds$ を用いて次式のように表される。

$$dL_s(p, \omega) = -\sigma_s(p)L(p, \omega)ds \quad (1)$$

また、吸収は入射光が媒体内の粒子へ衝突することで入射光エネルギーの一部が失われる現象である。放射輝度 $L_a$ の変化は吸収の強さを表す吸収係数 $\sigma_a$ と微小な距離 $ds$ に応じて次式のように変化すると表すことができる。

$$dL_a(p, \omega) = -\sigma_a(p)L(p, \omega)ds \quad (2)$$

本研究ではこれらの光学現象に焦点を当てた再現を行う。つまり、物体位置のある1点における、特定の方向からの入射と観測での散乱と吸収による光の広がる様子を再現する。また、これを本研究における散乱特性と呼ぶ。

### 2.2. 実物体での再現手法

散乱特性を再現するには2.1節で挙げた、散乱係数と吸収係数の2つの物理パラメータを適切に調整できる必要がある。そのため、1章で示した従来の散乱特性の再現方法よりもパラメータの調整が容易になると期待できる手法として、本研究では液体の混合に注目する。その理由として、均一な混合や自由に濃度をコントロールできる点のほか、様々な光学特性の液体を用意できる点が挙げられる。特に散乱特性に注目すると、例えば水は透明な液体であり、光は媒体内を透過し、ほぼ散乱も吸収も起こさないような散乱特性を持っていると言える。またNarasimhanら[4]によると、散乱は強いが吸収は弱いような散乱溶液として牛乳や石鹸を溶かした溶液等があり、一方で散乱は弱い吸収は強いような吸収溶液としてコーヒーや赤ワイン等がある。これらの理由からも、液体を使用することで簡易なコントロールと様々な散乱特性を再現できることが考えられる。

そこで、散乱も吸収も弱い液体(以下、標準溶液)、散乱が強い液体(以下、散乱溶液)、吸収が強い液体

(以下、吸収溶液)の3種類の散乱特性の異なる液体を物理的に混合することで、散乱特性の再現を目指す。本研究では、特徴的な散乱特性を持つ3種類の液体を混合する際の混合比率によって、所望の散乱特性を持つ半透明物体を再現する。

### 2.3. 混合比率の推定方法

従来、散乱特性は2.1節で述べた散乱係数、吸収係数のような物理パラメータによって表され、光が観測方向に散乱される割合を示す位相関数を用いて表されてきた。これらのパラメータは制約のある物理モデルに基づいて推定されている。本研究では物体に光を入射した時に散乱の影響で光が空間的に広がる様子を注目し、計測に基づいた定量化を行うことで、従来よりも簡易に散乱特性としてのパラメータを取得する。そのため、散乱特性のパラメータとして、光の広がる大きさ、明るさ、非等方性を構成要素とし、ここではそれを散乱プロファイルとして定量化する。取得方法としては、後述する撮影環境において得られた画像から、光が散乱している様子が観測される微小領域のパッチ画像を生成する。ただし、レーザのスペックル等の影響を除去するため、メディアンフィルタによって画像を平滑化する。そして、輝度値の最大値が画像の中心になるように画像を切り取り、パッチ画像を生成する。その後、パッチ画像の中心から上下左右方向に走査を行い、各画素 $u$ での輝度値 $x_u$ を取得することで散乱プロファイル $X$ を得る(図1)。

そして、定量化された散乱特性と液体の混合比率の関係をモデル化し、所望の散乱特性を再現するために混合比率を推定する。本研究では散乱特性を表す散乱プロファイル $X$ は液体の混合比率と関係があると仮定し、混合比率 $y$ を散乱プロファイル $X$ の各画素における輝度値 $x_i$ の線形和によって定式化する。ただし、 $M$ はパッチ画像の画素数、 $w_1, \dots, w_M$ は係数、 $w_{M+1}$ は定数項とする。

$$y = \sum_{i=1}^M x_i w_i + w_{M+1} \quad (3)$$

係数や定数項を求めるため、散乱溶液と吸収溶液、標準溶液を任意の比率で混合した混合物を作成し、その散乱プロファイルを計測して事例を収集する。3種類の液体の混合比率 $Y$ と散乱プロファイル $X$ の関係は以下のように行列の形で表すことができる。ただし、 $n = 1, 2, \dots, N$ であり、 $N$ はサンプル数を表す。

$$Y = XW \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{2,1} & y_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{1,N} & y_{2,N} & y_{3,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{M,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1,N} & \cdots & x_{M,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & & w_{1,1} & w_{2,1} & w_{3,1} \\ & \ddots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & 1 & w_{1,M+1} & w_{2,M+1} & w_{3,M+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

真値と推定値の誤差が最小になるように係数 $w$ を求める最小二乗法によって、推定に使用する $W_{est}$ を導出する。

$$W_{est} = \underset{W}{\operatorname{argmin}} \|Y - XW\|^2 \quad (6)$$

しかし、この定量化では散乱プロファイルを構成するデータが高次元すぎることから過学習が起きてしまい、安定した推定結果が得られないと予想される。そこで、散乱プロファイルから空間的な光の広がりをもより低次元に定義できる特徴量を抽出する。ここでは、明るさを表す最大値 $x_{max}$ 、光の広がる大きさを表す2方向の半値全幅 $\omega_p$ 、 $\omega_v$ 、非等方性を表す特徴量 $e$ の4つを用いる。特徴量の取得方法は図2に示すように、半値全幅は最大値の半分の値同士の距離(画素数)、非等方性は式(7)のように求める。

$$e = \frac{h_l}{h_r} \quad (7)$$

この4つの特徴量を説明変数とし、混合比率を目的変数とした重回帰を解くことで混合比率の推定を試みる。ただし、 $c_1, \dots, c_5$ はそれぞれ回帰係数とする。

$$y = c_1 \omega_l + c_2 \omega_c + c_3 x_{max} + c_4 e + c_5 \quad (8)$$

式(4)、(5)と同様に収集した事例サンプルに対し、3種類の液体の混合比率 $Y$ と特徴量 $V$ の関係は以下のように行列の形で表すことができる。

$$Y = VC \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{2,1} & y_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{1,N} & y_{2,N} & y_{3,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{l,1} & \omega_{c,1} & x_{max,1} & e_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_{l,N} & \omega_{c,N} & x_{max,N} & e_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{1,5} & c_{2,5} & c_{3,5} \end{bmatrix} \quad (10)$$

そして、式(6)と同様に最小二乗法によって、推定に使用する $C_{est}$ を導出する。

$$C_{est} = \underset{C}{\operatorname{argmin}} \|Y - VC\|^2 \quad (11)$$

### 3. 実験

#### 3.1. 散乱特性の計測

本研究では、特徴的な散乱特性の液体を混合することによって散乱特性の再現を行う。しかし、液体を物理的に混合させた時に起こる液体の散乱特性の変化はシミュレーションベースでは行われている[4]が、実際の観測は行われていない。そこで、散乱特性の異なる液体の混合物と散乱特性の関係を実際に計測によって取得する。計測環境は図3に示す。暗室において、レーザー光源を仰角45度方向からシャーレ内の液体に対して入射し、その様子を仰角90度方向からカメラで撮影する。光源はKOKUYO社の緑色のレーザーを使用する。カメラはNikon D5300を使用して撮影を行う。また、計測対象の液体が入ったシャーレの下には黒いフェルトを置くことで、相互反射等の影響を抑制した。今回は散乱溶液としては牛乳、吸収溶液としてはコーヒー、標準溶液として水を使用した。また、15パターンの混合比率で総量が100[ml]になるように事例を収集し、撮影を行う。

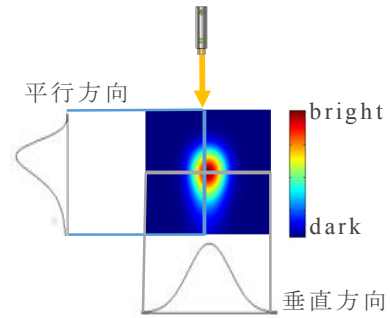


図1. 散乱プロファイルの取得方法

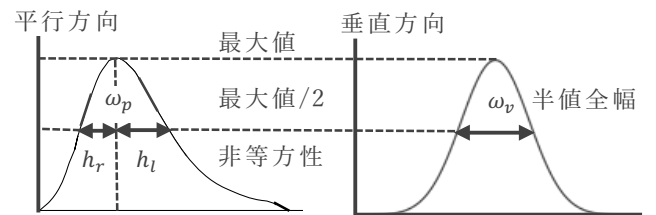


図2. 特徴量の取得



図3. 計測環境

### 3.2. 推定精度の検証

サンプルデータを用いて、提案した定量化とモデルの有効性を確認する。評価には Closed Test(Closed)と Leave-one-out 交差検定(LOOCV)を行い、各液体の絶対誤差によって評価する。散乱プロファイルによる推定と特徴量による推定精度を表 1 に示す。表 1 から、散乱プロファイルによる推定では Closed Test において、誤差がほぼ 0 になるオーバーフィッティングが起こっており、LOOCVでの推定誤差が特に吸収溶液と標準溶液で大きくなっていることが分かる。この結果からも、散乱プロファイルによる推定では安定した推定は難しいことが分かる。一方で、特徴量を使用することで、Closed Test での推定誤差からも過学習は解消され、LOOCVでの推定誤差からも散乱プロファイルによる推定と比較すると、概ね推定精度が向上していることが分かる。

### 3.3. 半透明物体の再現

今回は再現対象として、光学的に薄いようなポリエチレンとロウの再現を行う。図 3 の環境で撮影を行い、特徴量を取得する。取得した特徴量に基づいて混合比率を推定し、推定結果に基づいて作成された混合液と対象物体の比較を図 4 に示す。上段は通常光源下で撮影した画像の G チャンネルを示したもので、下段はパッチ画像の輝度を疑似カラーで表現したものを示している。また、特徴量による比較を表 2 に示し、定量的な評価も行う。図 4 からポリエチレンもロウも非等方的に広がる様子が概ね再現できていることを確認した。一方で、表 2 からロウの再現において作成されたレプリカは実物と比べて  $x_{max}$  が大きいことが分かる。これは明るさと広がりとは個別に制御することはできず、再現に使用する液体に再現範囲は依存することが示唆されている。

表 1. 定量化による推定精度の違い

		絶対誤差[m]		
		散乱	吸収	標準
散乱 プロファイル	Closed	0.00	0.00	0.00
	LOOCV	5.44	88.74	104.67
特徴量	Closed	6.47	24.11	19.70
	LOOCV	8.71	32.15	26.31

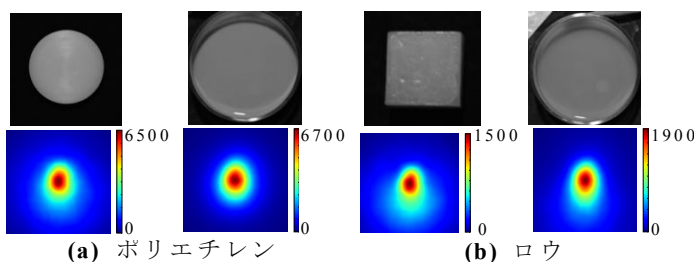


図 4. 対象物体(左)と再現結果(右)の比較

表 2. 特徴量による定量評価

		$\omega_p$	$\omega_v$	$x_{max}$	$e$
PE	対象物体	56	42	6414	1.40
	レプリカ	57	47	6657	1.07
ロウ	対象物体	61	39	1428	2.14
	レプリカ	63	42	1848	1.67

### 4. まとめ

本研究では特徴的な散乱特性の液体を混合することで所望の散乱特性の再現を行った。液体の混合比率と散乱特性の関係をサンプリングベースのモデル化を行うことを提案し、複数の半透明物体の再現を行い、再現精度を確認した。

今後の課題としては、再現できる散乱特性の範囲を広げること。また、散乱は波長に依存することが知られているため、波長への依存性についても検討する必要がある。そして、実際に形のあるレプリカへの適用などが挙げられる。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K16027, JSPS 科研費 JP15H05918 (新学術領域研究「多元質感知」) の助成を受けたものです。

### 文献

- [1] Miloš Hašan, Martin Fuchs, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, and Szymon Rusinkiewicz, "Physical Reproduction of Materials with Specified Subsurface Scattering," ACM Transactions on Graphics, Vol.29, No.3, pp.1-10, Los Angeles, the USA, July.2010.
- [2] Yue Dong, Jiaping Wang, Fabio Pellacini, Xin Tong, and Baining Guo, "Fabricating Spatially-Varying Subsurface Scattering," ACM Transactions on Graphics29, Vol.29, No.4, pp.1-10, Los Angeles, the USA, July.2010.
- [3] Marios Papas, Christian Regg, Wojciech Jarosz, Bernd Bickel, Philipp Jackson, Wojciech Matusik, Steve Marschner and Markus Gross, "Fabricating Translucent Materials Using Continuous Pigment Mixtures," ACM Transactions on Graphics, Vol.32, No.3, pp.1-12, Anaheim, the USA, July.2013.
- [4] Srinivasa G. Narasimhan, Mohit Gupta, Craig Donner, Ravi Ramamoorthi, Shree K. Nayer, and Henrik Wann Jensen, "Acquiring Scattering Properties of Participating Media by Dilution," ACM Transactions on Graphics, Vol.25, No.3, pp.1003-1012, Boston, the USA, July.2006.