

半透明物体の散乱特性再現を目的とした液体の混合比率推定 —ポスター—

伏下 晋[†] 久保 尋之[†] 船富 卓哉[†] 向川 康博[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: [†] {fushishita.shin.fh0, hkubo, funatomi, mukaigawa}@is.naist.jp

あらまし コンピュータグラフィクス分野では、肌のような半透明物体の表現は表面下散乱現象のモデル化によって実現されているが、所望の半透明感を再現した物体を製作することは容易ではない。本研究では散乱特性の異なる液体の混合によって、半透明物体の散乱特性を実物体で再現することに取り組む。まず、再現に使用する液体として、半透明感を左右する光学現象である散乱と吸収に着目し、それぞれ異なる性質を持つ液体を選定する。それらの液体の混合比率と混合物の散乱特性との関係を調べる。得られた関係に基づき、所望の半透明物体の散乱特性の再現に最適な混合比率を推定する。実際に半透明物体の再現を行い、精度を確認した。

キーワード デジタルファブリケーション, 半透明物体, 表面下散乱

Estimating Mixture Ratio of Liquids for Reproducing Scattering Property of Translucent Objects — Poster —

Shin FUSHISHITA[†] Hiroyuki KUBO[†] Takuya FUNATOMI[†] and Yasuhiro MUKAIGAWA[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

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

E-mail: [†] {fushishita.shin.fh0, hkubo, funatomi, mukaigawa}@is.naist.jp

Abstract Realistic expression for translucent objects such as human skin is achieved by subsurface scattering modeling in computer graphic field. However, it is difficult to reproduce the scattering property as real objects. In this research, we aim to reproduce scattering property of translucent objects as real object by mixing scattering liquids. First, we choose several liquids which have different characteristics based on optical phenomena in translucent objects. We analyze the relationship between mixture ratio and the scattering property of the mixed liquid. Then, we attempt to estimate optimal mixture ratio by the acquired relationship in order to reproduce given translucent objects. We confirmed accuracy of estimated and reproduced some translucent object by experiments.

Keyword Digital Fabrication, Translucent Object, Subsurface Scattering

1. はじめに

人の肌や果物、大理石のような半透明物体を CG でリアルに表現するためには表面下散乱現象を忠実に再現する必要がある。しかし、表面下散乱は複雑な光学現象であり、CG で厳密に再現することは難しい。Jensen ら[1]や d'Eon ら[2]は制約のある近似モデルとして表面下散乱モデルを提案した。また、Narasimhan ら[3]は表面下散乱モデルと計測に基づいて、物理特性を表すパラメータを推定した。これらの研究では表面下散乱モデルや推定されたパラメータによって、リアルな CG が表現されている。しかし、所望の表面下散乱現象を生じる物体を実際に製作する手法は確立され

ていない。現在、実際の物体での再現として、職人の技術によるレプリカの製作が食品サンプルや装飾義肢などで使用されている。しかし、これらのレプリカは職人の手作業によって製作されるため、時間的なコストの負担が大きい。また、そのレプリカのリアルさは職人の感性によるものが大きく、職人の感覚に依存する。本研究では定量的に光学特性を考慮し、実際の物体による半透明物体の再現を目指す。

関連研究として、浅田ら[4]は書画の質感再現を目的に、反射率と透過率の同時再現に取り組んだ。また、半透明物体の再現に焦点を当てたものとして、Brunton ら[5]は半透明物体の色の再現がなされる造形に関して取り組んだ。Hašan ら[6]や Dong ら[7]は半透明物体

の散乱特性と形状を再現した。これらの研究では使用する素材と再現したい形状に基づいて、所望の半透明物体の散乱特性を再現した。Papas ら[8]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。これらの研究では顔料の持つ散乱特性から表面下散乱モデルに基づいてパラメータを推定し、再現を行なった。以上の研究は物理モデルに基づいた推定と再現を行なっており、再現に使用するパラメータは実測から安定して推定することは困難である。

本研究では物理モデルを使用せず、実測で得たデータに基づいて半透明物体の散乱特性を再現する。半透明物体に関する光学現象の散乱と吸収に着目し、この観点から性質が異なる複数の液体を混合する比率を決定することによって、散乱特性の再現を目指す。本稿では、任意の半透明物体に対して、その散乱特性から最適な液体の混合比率を推定するシステムを提案する。

2. 混合比率の推定

2.1. 半透明物体に関する光学現象

半透明物体に起こる光学現象として、散乱と吸収がある。散乱は半透明物体に見られる特有の複雑な現象であり、入射光が媒体内の粒子へ衝突することによって、ランダムな方向に光路が変化するものである。放射輝度 L_s は位置 p から ω 方向の光が散乱する確率を意味する散乱係数 σ_s 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。

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

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 が位置 p から ω 方向の光が吸収する確率を意味する吸収係数 σ_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。

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

これらの散乱と吸収を合わせた光伝播は半透明物体に関する光学現象であり、微小な距離 ds 進む間の入射エネルギーの変化量 dL は

$$dL(p, \omega) = dL_a(p, \omega) + dL_s(p, \omega) \quad (3)$$

その光学現象の強さを表す消滅係数 σ_t は

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \quad (4)$$

とそれぞれ表すことができる。この様子を図 1 に示す。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。また、これらの散乱と吸収を合わせて散乱特性と呼ぶことにする。

2.2. 実物体での再現手法

本研究では散乱も吸収も弱い液体(水)、散乱が強い液体(散乱溶液)、吸収が強い液体(吸収溶液)の3種類を混合することによって、様々な液体の散乱特性の再現を行う。液体の混合時の配合量を制御することによって、散乱と吸収の度合いを変化させ、所望の散乱特性を持つ半透明物体を再現する。

本研究では物理モデルに基づいたモデルベースではなく、実測に基づいたサンプルベースによって再現を目指す。入力には半透明物体の散乱特性を表す散乱プロファイルを使用する。そして、使用する液体をいくつかの比率で混合したものとその混合物の散乱特性の関係から混合比率と散乱特性の関係をモデル化する。そのモデルに基づいて、対象とする半透明物体の散乱特性を再現できる混合比率を推定する。図 2 に本研究のコンセプトを示す。

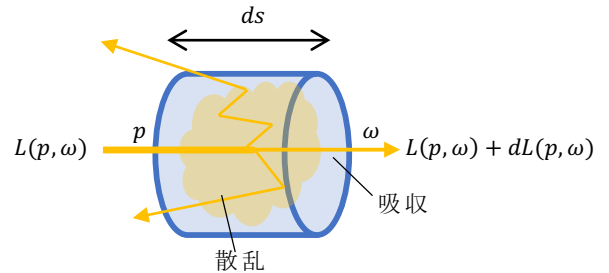


図 1. 散乱及び吸収の模式図

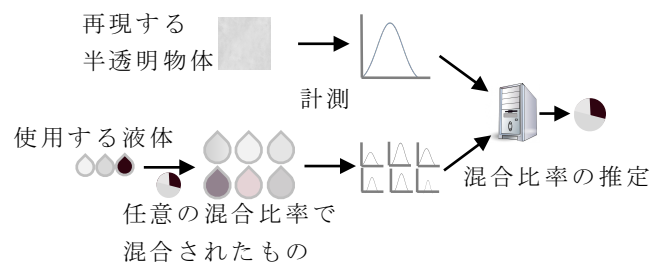


図 2. 散乱特性再現のコンセプト

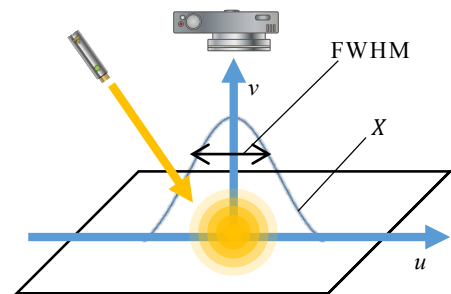


図 3. 散乱プロファイル

2.3. 半透明物体の散乱特性

本研究では半透明物体の散乱特性(散乱と吸収)は散乱プロファイル X として定量化することにする。 m が次元だとすると、散乱プロファイルは物体に光を照射した時、照射した光が空間的に広がる様子をカメラで撮影し、各画素 u での輝度値 x_u を取得することで得られる次式に示すベクトル X である。ただし、 $u = 1, 2, \dots, m$ を意味している。その模式図を図3に示す。

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m] \quad (5)$$

2.4. 推定方法

所望の散乱特性を再現するためには液体の混合比率と散乱特性(散乱・吸収)の関係を利用する必要がある。本研究では液体の混合比率と散乱特性を表す散乱プロファイルの関係が線形であると仮定する。すると、混合比率 c は散乱プロファイル、つまり、次式のように各画素値 x_i の線形和で表せる。ただし、 w は定数項とする。

$$c = \sum_{i=1}^m x_i w_i + w_{m+1} \quad (6)$$

ここで、散乱溶液と吸収溶液、水と散乱溶液、水と吸収溶液をそれぞれいくつかの混合比率で混ぜ合わせる。その時、混合比率とその混合物の散乱特性から3種類の混合比率(C)と散乱プロファイル(X)の関係を式(7)のように行列の形で表すとする。ただし、 $n = 1, 2, \dots, N$ を意味しており、 n はサンプル数を表すとすると、行列 C の $c_{n,1}, c_{n,2}, c_{n,3}$ はそれぞれ3種類の液体の混合比率を表すため既知であり、また、行列 X の $[x_{n,1}, \dots, x_{n,m}, 1]$ は前述した散乱プロファイルと定数項を表すベクトルであるため、観測によって得られる。以上の得られる式から最小二乗法によって行列 W を求める。

$$\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & c_{N,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,m} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,m} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & w_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{m+1,1} & w_{m+1,2} & w_{m+1,3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\operatorname{argmin}_W \|C - XW\|^2$$

こうして得られた行列 W によって、入力された散乱特性 X を実現する混合比率 C を次式によって推定する。

$$[c_1 \ c_2 \ c_3] = [x_1 \ \dots \ x_m \ 1] \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & w_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{m+1,1} & w_{m+1,2} & w_{m+1,3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. 検証実験

前章で述べた混合比率の推定手法の精度と評価を検証する実験を行う。

3.1 計測環境

まず、前章で述べた散乱プロファイルを計測するシステムについて述べる。計測環境を図4に示す。暗室において、緑色のレーザーを仰角45度方向から液体の入ったシャーレに照射し、その様子を仰角90度方向からカメラで撮影する。カメラはNikonのD5300を使用し、Rawモードの14bitで撮影した。また、液体の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。前述した散乱プロファイルの取得は各撮影画像の輝度値の最大値 X_{max} によって位置合わせを行い、その最大値の画素(u, v)から u の正負両方向に50pixelずつ($u \pm 50[\text{pixel}]$)の合計100pixelの輝度値の変化を取得した(図3)。なお、光源にはKOKUYO社の緑色のレーザーを使用し、今回の実験ではGチャンネルの輝度値のみを使用する。ここで、Narasimhanら[3]は式(1)の散乱と式(2)の吸収の強さを表す係数を様々な液体について推定しているため、これを参考に実験に使用する液体を選定した。本実験では散乱溶液としては散乱が強く、吸収が非常に弱い液体である牛乳、吸収溶液としては散乱が非常に弱く、吸収が強い液体であるコーヒーを使用する。

3.2 混合比率と散乱特性の関係の検証

まずは2.4節で線形と仮定した混合比率と散乱プロファイルの関係性を検証した。評価には散乱プロファイルの最大値の半分の値における画素間の距離を使用し、これを半値幅(FWHM)と呼ぶ(図3)。計測対象として表1, 2に示すような容量で混ぜ合わせた合計11サンプルを作成し、計測を行った。

表1. 散乱溶液と水、吸収溶液と水の混合物

散乱溶液 [ml]	100	80	60	40	0	0	0
吸収溶液 [ml]	0	0	0	0	100	80	60
水 [ml]	0	20	40	60	0	20	40

表 2. 散乱溶液と吸収溶液の混合物

散乱溶液 [ml]	80	60	40	20
吸収溶液 [ml]	20	40	60	80

図 5, 6, 7 に撮影された画像の一部を切り取ったもの、図 8, 9, 10 に液体の散乱プロファイル、及び半値幅と混合比の関係を示す。ただし、水と散乱溶液、及び水と吸収溶液の混合液では、濃度が薄くなるにつれて単一散乱が支配的になるため、散乱溶液が 20[ml]となる混合溶液と吸収溶液が 40, 20[ml]となる混合溶液については考慮しない。

それぞれの結果から、各混合比率と半値幅の間には、3 種類とも強い負の相関関係が見られた。このことから散乱プロファイルと混合比率の間にも相関関係が成り立つと考えられ、その関係を利用する。

3.3 提案モデルによる推定精度の検証

計測された散乱プロファイルをもとに混合比率の推定を行い、システムの推定精度を検証した。

検証方法としては leave-one-out 交差検定を行う。計測データの 11 サンプルのうち 10 サンプルを行列 W の推定に用いて、残り 1 つのサンプルデータに対して混合比率を推定し、真値との絶対誤差を算出するという操作を全サンプルに対して行う。それらの絶対誤差の平均値によって推定精度を確認する。結果は表 3 に示す。ただし、小数第 2 位を四捨五入した。

表 3. LOOCV によって評価した誤差

散乱溶液 [ml]	吸収溶液 [ml]	水 [ml]
12.0	287.8	140.6

表 3 から吸収溶液と水の絶対誤差が大きいことが確認された。

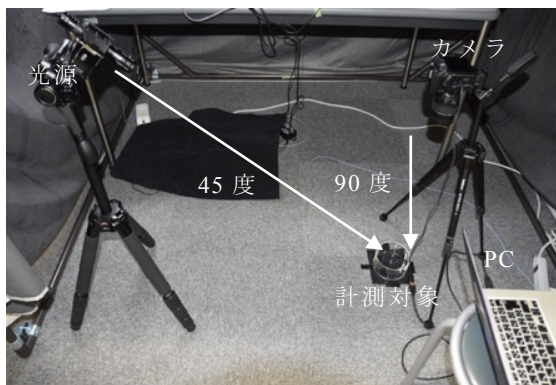


図 4. 計測環境



図 5. 撮影画像 (散乱溶液: 水)
左から原液, 8:2, 6:4, 4:6

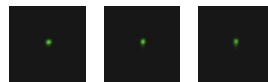
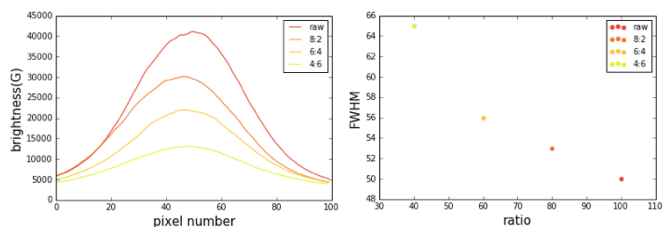


図 6. 撮影画像 (吸収溶液: 水)
左から原液, 8:2, 6:4

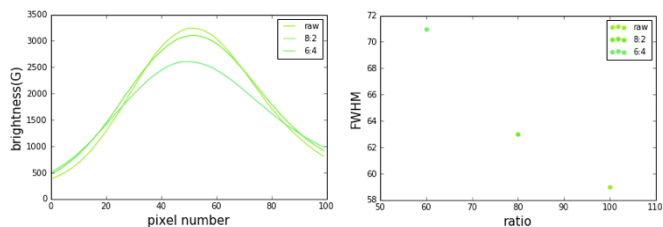


図 7. 撮影画像 (散乱溶液: 吸収溶液)
左から 8:2, 6:4, 4:6, 2:8



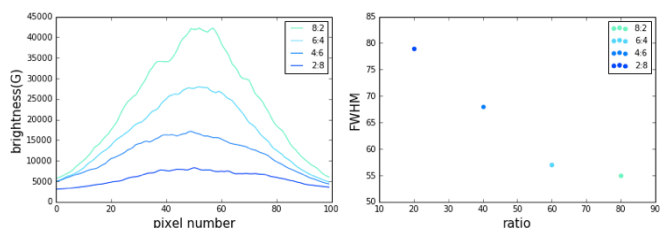
(a) 散乱プロファイル (b) 混合比率と半値幅の関係

図 8. 散乱溶液と水の混合比率と散乱特性の関係



(a) 散乱プロファイル (b) 混合比率と半値幅の関係

図 9. 吸収溶液と水の混合比率と散乱特性の関係



(a) 散乱プロファイル (b) 混合比率と半値幅の関係

図 10. 散乱溶液と吸収溶液の混合比率と散乱特性の関係

3.4 半透明物体の再現による検証

本検証において再現する半透明物体として、散乱溶液でもあるカルピスを使用する。全計測データの 11 サンプルを用いて行列 W を推定し、これを用いて推定された混合比率で作成した混合物と実測で散乱プロファイルの比較を行い、再現精度の検証を行う。まず、再

現対象物を 3.1 節で使用したのと同様の計測環境(図 4)で計測し、散乱プロファイルを取得した。散乱プロファイルに基づいて混合比率の推定を行い、混合物を作成した。混合物の散乱プロファイルについても計測を行い、その結果に基づいて、再現精度の評価を行う。

再現対象物の散乱プロファイルを入力して推定された混合比率は、散乱溶液が 15[ml], 吸収溶液が 0[ml], 水が 85[ml]となった。ただし、小数第 1 位以下は四捨五入した。図 11, 12(a)に再現対象物と再現結果の液体, (b)に散乱プロファイルの計測環境(図 4)で撮影された画像, (c)に疑似カラーで示したものを示す。図 13 にそれぞれの散乱プロファイルを示す。また、再現対象と再現結果の液体の散乱プロファイルから得られた半値幅の絶対誤差は 31 となった。

これらの結果から半値幅の誤差も大きく、再現できたとは言い難い結果になった。また、図 11, 12 の(c)からも混合物が再現対象物よりも散乱が強い様子が確認できる。これは混合比率の推定結果からも吸収をうまく調整できなかったことが原因だと考えられる。

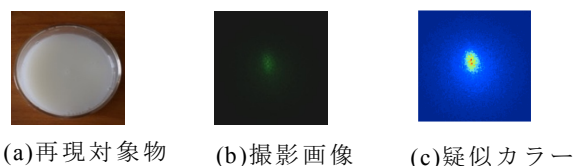


図 11. 再現対象物(カルピス)

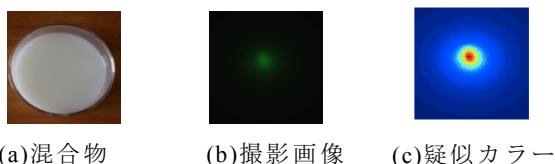


図 12. 推定された混合比率で作ったレプリカ

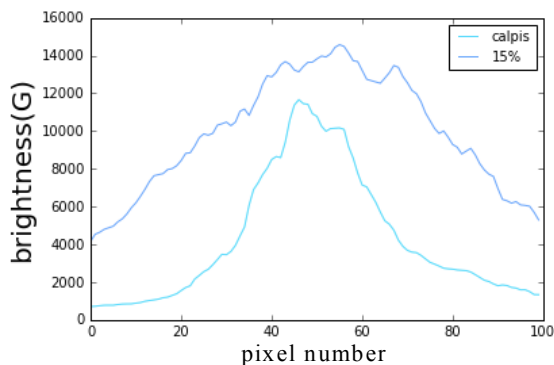


図 13. 散乱プロファイルによる比較

4. 推定モデルについての考察

4.1 推定モデルの再検討

今回の実験においては再現精度が十分いいとは言えない結果になった。その原因として、実測データの散乱プロファイルそのものを使用した推定精度が不十分であることが考えられる。表 3 から誤差が大きいことが確認され、特に制御できていなかったと考えられる吸収の誤差も非常に大きく推定は困難だと分かった。

推定精度が不十分な原因としては高次元な散乱プロファイルによる過学習が考えられる。今回使用している散乱プロファイルは 100 次元と非常に高次元なデータではあるが、データとして重要な変化をしている部分は各サンプルにおいて、ある程度定まっていると考えられる。そこで、散乱プロファイル(11 sample \times 100 dimension) に対して主成分分析による次元削減を行うことによって推定を試みる。2 次元に次元削減をした結果、寄与率は第 1 主成分が 98.7%, 第 2 主成分が 0.7% となった。第 1 主成分のみを使用した推定と比較として第 2 主成分も使用した推定を行う。第 1 主成分のみを使用する場合、得られた主成分 y_1 と定数項の行列 Y_1 によって、重み W' を求める。第 2 主成分も使用する場合は得られた主成分 y_1, y_2 と定数項の行列 Y_2 によって、重み W' を求め、混合比率 C を推定する。

$$\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & c_{N,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{N,1} & y_{N,2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w'_{1,1} & w'_{1,2} & w'_{1,3} \\ w'_{2,1} & w'_{2,2} & w'_{2,3} \\ w'_{3,1} & w'_{3,2} & w'_{3,3} \end{bmatrix}$$

$$\underset{W'}{\operatorname{argmin}} \|C - YW'\|^2 \quad (10)$$

$$[c_1 \quad c_2 \quad c_3] = [y_1 \quad y_2 \quad 1] \begin{bmatrix} w'_{1,1} & w'_{1,2} & w'_{1,3} \\ w'_{2,1} & w'_{2,2} & w'_{2,3} \\ w'_{3,1} & w'_{3,2} & w'_{3,3} \end{bmatrix}$$

4.2 推定精度の検証

前章で述べた推定モデルの精度を検証し、有効性を確認する。方法としては、同様に leave-one-out 交差検定を行う。計測済みの 11 サンプルの散乱特性 X に対し、主成分分析によって次元を削減する。削減されたデータの 11 サンプルのうちの 10 サンプルによって W' を求め、残りの 1 サンプルによって混合比率を推定し、推定された混合比率と真値との絶対誤差を求める操作を全サンプルで行い、その平均値によって評価をする。1 次元と 2 次元に削減したデータによって検証した結果を表 4 に示す。ただし、小数第 2 位を四捨五入した。

表 4. 次元削減した場合

	散乱溶液 [ml]	吸収溶液 [ml]	水 [ml]
1次元	8.8	25.0	16.4
2次元	9.6	27.4	21.9

この結果から、 X をそのまま用いた場合(表 3)よりも推定精度が向上していることが確認できた。また比較として、第 2 主成分を加えて推定した場合、精度が落ちている。これは寄与率が 1 次元で既に約 98%を占めていることから、今回の使用した散乱プロファイルは 1 次元で十分に推定が可能だと考えられる。

また、この式(10)のモデルを用いて、再現対象(カルピス)の混合比率推定を行なった。混合比率の推定結果は散乱溶液が 63[ml]、吸収溶液が 25[ml]、水が 13[ml]となった。今後は実環境実験において、散乱プロファイルの再現精度を確認する必要がある。

5. おわりに

本稿では所望の半透明物体に対して、3 種類の液体の混合によって、散乱プロファイルによって表される散乱特性を再現する方法について述べた。事前に混合比率とその混合物の散乱特性の関係性を実測に基づいてモデル化し、所与の散乱プロファイルを再現する混合比率の推定について示した。また、実験によって、混合物と実物の散乱特性を比較し、再現性を検証した。そして、推定精度を向上するために主成分分析によって特徴量を抽出し、特徴量による推定精度の向上を検証した。

今後はより多くの散乱特性を再現できるような液体の選定と組み合わせについての検討が必要と考えている。今回の 3 種類の液体による組み合わせで少なくとも 2 自由度の調整が可能だと考えていた。しかし、主成分分析を行った結果、1 次元の変数のみで約 98%の寄与率であるという結果から、今回の計測データでは実質 1 自由度のみの調整しかできていなかったと考えられる。これでは再現できる散乱特性としてはバリエーションが少ない。そのため、よりバリエーションを得られるように液体の選定をし直す必要がある。また、今回は制約条件を何も付けずに推定を行なった。再現したい散乱特性によっては負の値や大量の液体の量を出力されることも考えられるため、非負制約や量の制約条件などを加えることについて検討する必要がある。また、波長にも影響がある散乱の色の再現性等について検討していきたいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K16027, 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] Henrik Wann Jensen, Stephen R. Marschner, Marc Levoy, and Pat Hanrahan, "A Practical Model for Subsurface Light Transport," In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp.511-518, Los Angeles, the USA, Sept.2001.
- [2] Eugene d'Eon, Geoffery Irving, "A Quantized-Diffusion Model for Rendering Translucent Materials," ACM Transactions on Graphics, Vol.30, No.4, Article 56, pp.1-14, Vancouver, Canada, July.2011.
- [3] 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.
- [4] 浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, "書画の質感再現を目的とした反射率と透過率を同時に再現するレプリカの作成," 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J99-D, No.8, pp.747-756, Aug. 2016.
- [5] Alan Brunton, Can Ates Arikan and Philipp Urban, "Pushing the Limits of 3D Color Printing: Error Diffusion with Translucent Materials," ACM Transactions on Graphics, Vol.35, No.1, Article 4, pp.1-10, Los Angeles, the USA, December.2015.
- [6] 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.
- [7] Yue Dong, Jiaping Wang, Fabio Pellacini, Xin Tong, and Baining Guo, "Fabricating Spatially-Varying Subsurface Scattering," ACM Transactions on Graphics, Vol.29, No.4, pp.1-10, Los Angeles, the USA, July.2010.
- [8] 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.