

散乱媒体中のライトトランスポートの解析

向川 康博[†] ラメシュラスカル^{††} 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所

^{††} マサチューセッツ工科大学 メディアラボ

E-mail: [†]{mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{††}raskar@media.mit.edu

あらまし 本研究では、散乱媒体中で光がどのように伝播していくかを解析する方法を提案する。散乱媒体に入射した光は、内部で散乱を繰り返し、複雑な光線空間を作り出す。本手法では、この散乱光のライトトランスポートを2段階に分けて解析する。まず、高周波ストライプパターンの投影によって、入射光を単一散乱と多重散乱に分離する。次に、ライトトランスポート方程式に基づいて、多重散乱を各反射回数ごとの成分に分解し、それぞれの成分に対応する光線空間を再帰的に推定する。実験により、均一な散乱媒体中でのライトトランスポートを、各反射回数ごとに分解し可視化できることを示した。

キーワード 単一散乱, 多重散乱, ライトトランスポート

Analysis of Light Transport in Scattering Media

Yasuhiro MUKAIGAWA[†], Ramesh RASKAR^{††}, and Yasushi YAGI[†]

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

^{††} MIT Media Lab

E-mail: [†]{mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{††}raskar@media.mit.edu

Abstract We propose a new method to analyze light transport in scattering media. The incident light undergoes multiple bounces in translucent objects, and produces a complex light field. Our method analyzes the light transport in two steps. First, single and multiple scattering are separated by projecting high-frequency stripe patterns. Then, multiple scattering is decomposed into each bounce component based on the light transport equation. The light field for each bounce is recursively estimated. Experimental results show that light transport in homogeneous scattering media can be decomposed and visualized for each bounce.

Key words single scattering, multiple scattering, light transport

1. はじめに

我々の身の回りにあるほとんどの物体は、完全な不透明ではない。金属以外の物体は、程度の差こそあれ、基本的には半透明の性質を持っていると考えてよい。半透明物体では、物体表面に入射した光は内部へ到達し、散乱を繰り返した後、複雑な光線空間を生み出す。しかし、散乱媒体中の光線空間を直接計測することは難しい。実際にどのように散乱が繰り返され、散乱光がどのように空間的に伝播していくかを知ることは、CG だけではなく、鉱石の材質判定や、拡散光を用いた医療画像診断など、幅広い応用分野のための基礎的な解析技術となる。

これまでに、霧や水中などの比較的透明度の高い（光学的な密度が低い）媒体で生じる単一散乱（シングルスキヤタリング）を解析する手法は多数提案されている。Narasimhan ら [1] は、水で薄めた均一な液体を対象として散乱のパラメータを推定した。Gu ら [2] は、構造化パ

ターンを投影することで不均一な媒体のパラメータを推定した。Hawkins ら [3] は、レーザを高速に走査することで、濃度が時間的に変化する場合にも対応させた。これらの手法は、光源から発せられた光線が散乱媒体中で一度だけ反射する、つまり図 1(a) に示すよう光路が一意に決まることを仮定することで、良好な解析結果を得ている。逆にいえば、媒体中での反射が一度だけと仮定できる透明度の高い散乱媒体しか解析できない。

透明度が低い（光学的な密度が高い）媒体を解析するためには、多重散乱（マルチスキヤタリング）が空間的にどのように分布するかをモデル化する必要がある。透明度が低い場合には、媒体に入射した光が散乱を何度も繰り返すため、図 1(b) に示すように指向性を失い、入射角度に依存せずに等方に分布することが知られている。Stam [4] は、多重散乱をディフュージョン近似と呼ばれる概念でモデル化した。また、Jensen ら [5] は、このディフュージョン近似を直接解くのではなく、光を吸

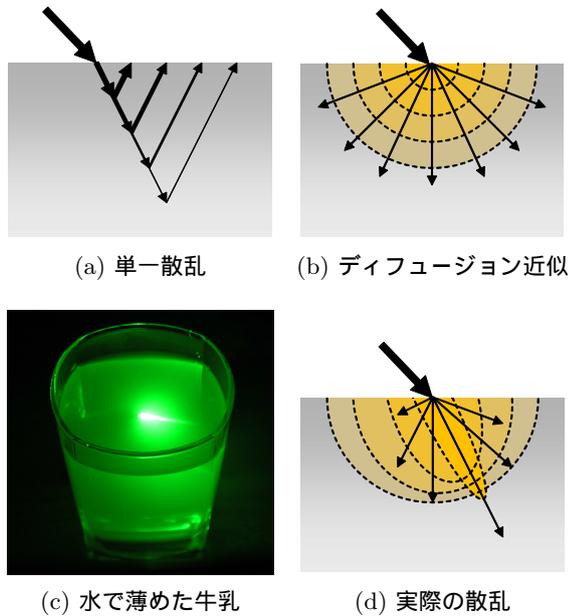


図1 散乱光の広がり様子。

収する負の仮想光源を加えることで近似的な解を与えるダイポールモデルを提案した。さらに, Donnerら [6] は, 多層構造を持った物体内部での散乱を表現できるようにマルチポールモデルに拡張している。しかし, これらのモデルでは, 入射光が散乱媒体中で数回だけ反射を繰り返すことで生じる低次の散乱光が作り出す非等方な分布を表現することができない。

近年, Donnerら [7] は, 入射方向に依存した分布を表現できる経験的モデルを提案している。例えば, 図1(c)は水で薄めた牛乳に緑色のレーザー光を照射した場合の見え方を示している。単一散乱だけではなく, 様々な反射回数の多重散乱が混在し, 図1(d)に図示するような複雑な光線空間を作り出していることがわかる。これが, 従来の単一散乱とディフュージョン近似の組合せでは解析できない, 現実に頻繁に生じる散乱である。このような一般的な散乱を解析するためには, Seitzら [12] が提案した相互反射成分をその反射回数ごとに分解するインバースライトトランスポートと同様に, 散乱光をその反射回数ごとに分解する必要がある。

本研究の目的は, 観測光を反射回数ごとに分解するという意味では, Seitzらのインバースライトトランスポートと同様の概念であるが, 半透明物体中の散乱光を分解するという点で大きく異なる。本研究では, 問題の単純化のために, 厚みのない2次元的に広がる均一な散乱媒体を仮定するが, 多重散乱を詳細に追跡することで, 入射方向に依存する複雑な分布を解析できる。本稿では, ライトトランスポート方程式に基づいて多重散乱を再帰的に予想することで, 低次の散乱光をも扱うことのできる新しい解析法について述べる。

2. 関連研究

ダイポールモデルに基づく解析: ダイポールモデルは,

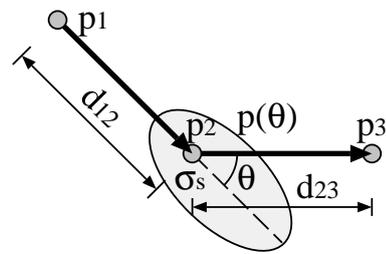


図2 散乱のモデル。

ディフュージョン近似に基づいた多重散乱をシンプルなパラメトリックモデルで近似するものであり, CGだけではなく画像解析にも用いられている。例えば, レンズを用いて物体表面の一点だけを照射したり [5], レーザ光を走査したり [8], プロジェクタを光源として用いたり [9], 光ファイバを用いた専用の照明・計測装置を用いたり [10], あるいは任意の照明環境下 [11] で撮影された画像にダイポールモデルを当てはめる研究などが報告されている。これらの手法は, ディフュージョン近似に基づいた解析であるため, 光学的な密度が高い物体にしか適用できない。

顔画像の反射解析: いくつかの顔画像の反射解析法は, 皮膚の半透明な性質に着目している。Tsumuraら [13] は独立成分解析によってヘモグロビンとメラニンの成分を分離し, 半透明性を变化させた見え方を合成する方法を示した [14]。最近では, 皮膚の多層構造に着目して, 写実的な顔画像を生成する方法がCG分野で盛んに研究されている [15] [16]。

医用画像: 興味深いことに, 医療分野で用いられる断層撮影でも, 本研究と同様の散乱光の振る舞いに関する問題を取り扱っている [17] [18]。X線を用いるコンピュータ断層撮影 (CT) では, X線が体内を直進するために散乱の問題を回避できる。しかし, より安全な拡散光トモグラフィ (DOT) では, 近赤外光が体内で散乱してしまうため, そのほとんどは散乱光が反射を無限に繰り返すと仮定したディフュージョン近似に基づいた解析をしている。ごく少数の研究が, ライトトランスポート方程式に基づいて, 低次の散乱光の影響を考慮したトモグラフィを実現しようと試みている [19]。

3. 散乱光が作り出す光線空間

3.1 散乱光の強度

散乱媒体中で, 光線は散乱を繰り返すごとに強度が弱くなる。そこで, まず, 散乱光の減衰をモデル化することから始める。図2は, ある点 p_1 から発せられた光線が途中の点 p_2 において散乱し, 点 p_3 にたどり着く様子を図示したものである。パーティシペイティングメディアの理論 [4] に従えば, 点 p_3 における光線の強度 l_{p_3} は, 次式のようにモデル化できる。

$$l_{p_3} = l_{p_1} \sigma_s p(\theta) e^{-\sigma_t(d_{12}+d_{23})}. \quad (1)$$

ここで、 l_{p_1} は点 p_1 における光線の強度を表し、 σ_s と σ_t はそれぞれ散乱係数、消滅係数と呼ばれる散乱媒体に固有のパラメータである。 d_{12} と d_{23} は、それぞれ点 p_1 から点 p_2 まで、点 p_2 から点 p_3 までの距離である。フェーズ関数 $p(\theta)$ は散乱の偏りを表し、次式で近似表現される。

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{\frac{3}{2}}}. \quad (2)$$

ここで、パラメータ g は、入射方向と散乱方向のなす角の余弦とフェーズ関数の積を全球面上で積分した値であり、散乱の等方性を決めるパラメータである。 g の値は、前方散乱では正に、後方散乱では負に、等方散乱の場合ゼロとなる。

3.2 光線空間の分解

シーン中のあらゆる点において、あらゆる方向に通過するすべての光線の強度分布は、光線空間 L で表現される。この光線空間は、それぞれの反射回数ごとに分解して考えることができる。ここで、光源から直接発せられ、一度も反射していない光線のみを表した 0 次反射の光線空間 L_0 を考える。散乱媒体中で、この L_0 は粒子に一度だけ衝突し、1 次反射の光線空間 L_1 を作り出す。この 1 次反射の散乱は、単一散乱（シングルスキヤタリング）と呼ばれる。その後、1 次反射の光線空間は照明として働き、2 次反射の光線空間 L_2 を作り出す。この様にして、 k 次反射の光線空間 L_k は、再帰的に $k+1$ 次反射の光線空間 L_{k+1} を作り出す。2 次以降の高次の散乱は、多重散乱（マルチスキヤタリング）と呼ばれる。散乱媒体中で生じる光線空間は、次式のように各反射回数ごとの成分の総和として表現される。

$$L = \sum_{k=1}^{\infty} L_k. \quad (3)$$

シーン中での光線の伝播は、ライトトランスポート行列 T を用いて表現することができる。この行列は、シーン中のある点のある方向に通過する光線がどのように他の点に伝播するかを表し、散乱媒体固有のパラメータが既知であれば、式 (1) から計算することが可能である。この行列を用いることで、単一散乱に相当する 1 次反射の光線空間は $L_1 = TL_0$ と表わされ、2 次反射の光線空間は $L_2 = TL_1$ と表される。同様にして、 k 次反射の光線空間 L_k は、次式のように再帰的に表される。

$$L_k = TL_{k-1}. \quad (4)$$

3.3 光線空間の次元数

ここで、具体的な光線空間の記述方法について考える。一般に、3 次元空間中の光線空間は、4 次元関数で

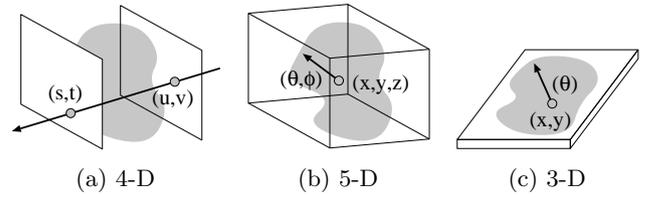


図 3 光線空間の次元数の比較。

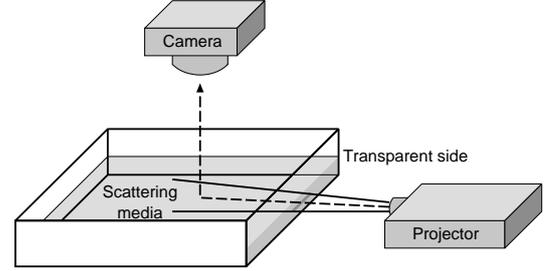


図 4 カメラとプロジェクタの配置。

表現できることが知られている。図 3(a) のように、対象空間を挟む 2 枚の平面を考えることで、すべての光線は (u, v) と (s, t) の二つの座標系で記述できる。しかし、この記述は、シーンが真空であり、光線強度が進行方向に沿って進む間に減衰しないと仮定している。

一方、散乱媒体中では、光線強度は進行方向に沿って進む間に減衰する。従って、図 3(b) のように、光線空間は位置 (x, y, z) と方向 (θ, ϕ) の 5 次元関数として記述しなければならない。しかし、実際には 5 次元関数は膨大な記憶容量を必要とするため、保持することも可視化することも極めて難しい。

ここで、対象とする散乱媒体を、厚みのない 2 次元的に広がる板状の空間に限定することができれば、図 3(c) のように、2 次元位置 (x, y) と単一の角度 (θ) を用いて、3 次元関数 $l(x, y, \theta)$ として記述することができる。すなわち、光線空間 L は、この 3 次元関数の集合として、次式のように定義される。

$$L = [l(0, 0, 0), \dots, l(W, H, 2\pi)]^T. \quad (5)$$

ここで、 W と H は、シーンの縦と横サイズを表す。

本研究では、厚みのない 2 次元媒体と、3 次元関数で表される光線空間を仮定することで問題を単純化し、散乱媒体中のライトトランスポートを完全に解析することを目指す。

3.4 光線空間と観測画像の関係

本研究では、図 4 に示すように、2 次元媒体から発せられる光線を、その法線方向から単一の固定カメラで記録する。撮影画像を I とすれば、この画像は次式のように反射回数ごとの成分画像に分解できる。

$$I = \sum_{k=1}^{\infty} I_k. \quad (6)$$

しかし、各反射成分画像 I_k は、対応する光線空間 L_k の

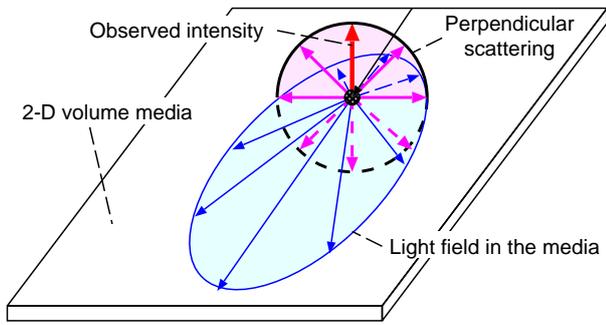


図5 光線空間と観測画像の関係。

断面ではない。光線空間が2次元媒体中の光線の分布を表すのに対して、観測画像は図5のように2次元媒体の表面から法線方向に出射する光線を記録したものである。

光線空間と観測画像を関連付けるために、我々は、散乱光の空間的分布は一般に進行方向に沿って回転対称になることを利用する。つまり、進行方向に対して垂直に散乱する光線の強度は、その方向に依らず一定となる。この散乱光の回転対称性を利用することで、カメラで観測される明るさは、式(1)において散乱角度を $\theta = \pi/2$ とした場合の強度に一致することがわかる。従って、 k 次反射の光線空間 L_k とライトトランスポート行列 T から、 $k+1$ 次の光線空間 L_{k+1} とその観測画像成分 I_{k+1} を予想することが可能となる。

4. ライトトランスポートの解析

4.1 解析の流れ

半透明物体に入射した光は、内部で散乱を繰り返し、複雑な光線空間を作り出す。我々の目的は、光の伝播を追跡し、光線空間を反射回数ごとに分解することによって、半透明物体中でどのように散乱光が伝播していくかを可視化することである。

解析の流れを図6に示す。まず、プロジェクタから高周波ストライプパターンを投影することで、単一散乱と多重散乱を分離する。次に、分離された単一散乱から消滅係数 σ_t を推定する。さらに、散乱パラメータを変化させながら、単一散乱から始めてより高次の多重散乱を順に予測していく。このようにして、光線空間は各反射回数ごとに分けて表現される。以下、具体的な解析手法について述べる。

4.2 単一散乱と多重散乱の分離

カメラで撮影される画像には、すべての反射回数の成分が混ざって記録されている。各反射回数ごとの成分は、それぞれ独自の空間分布を持っており、それらが混在された画像を直接分解することは難しい。そこで、本研究では、単一散乱と多重散乱を分離するための、プロジェクタを用いた新しい解析方法を提案する。

Nayarら[20]は、プロジェクタから2次元高周波パターンを投影することで、直接成分と大域成分を安定に

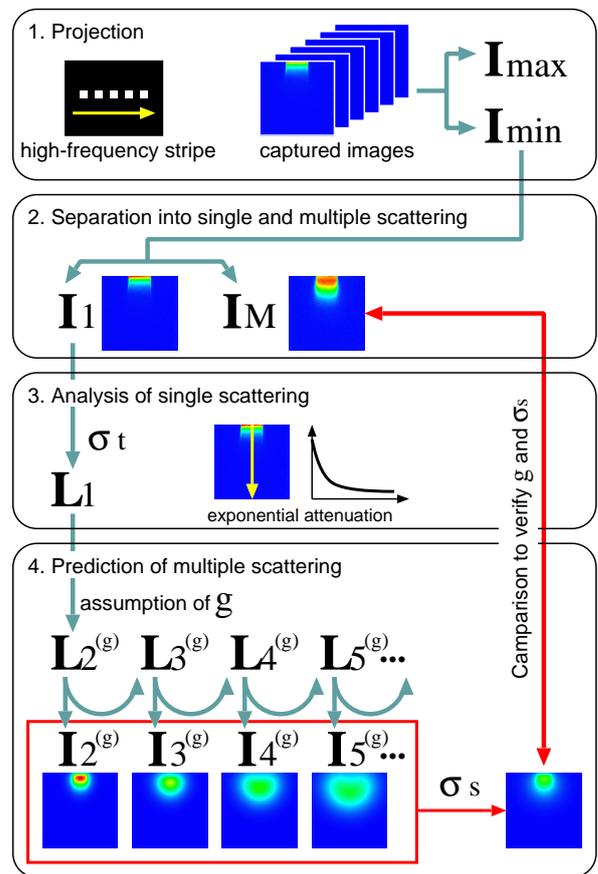


図6 解析の流れ。散乱媒体固有のパラメータ (σ_t , σ_s , g) は、それぞれ順番に推定される。

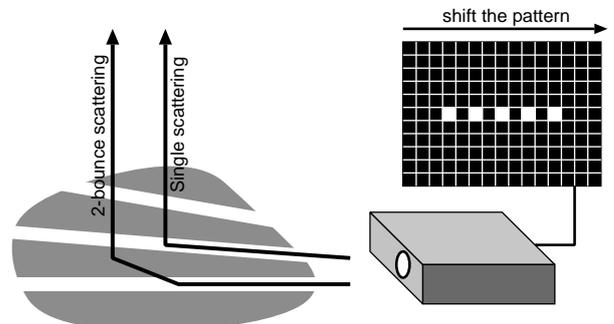


図7 高周波ストライプパターンの投影。ストライプをずらしながら撮影することで、単一散乱と多重散乱が分離される。

分離する方法を提案した。この手法では、直接成分は拡散反射と鏡面反射に対応し、大域成分は相互反射などの間接反射に対応する。

我々の場合は、物体表面での反射ではなく、散乱媒体中での単一散乱と多重散乱を分離する必要があるため、投影方法を工夫する。図7に示すように、一直線上で白と黒が交互に現れる1次元の高周波ストライプパターンを投影する。この場合、単一散乱は、媒体中で一度だけ反射することによって生じるため直接成分となる。一方、多重散乱は、プロジェクタから直接照らされることなく観測されるので大域成分となる。

この高周波ストライプパターンの位相を少しずつずらすことで、複数枚の画像を撮影する。同じ座標の画素毎に、画素値の最大値と最小値を探し、最大値からなる画像 I_{max} と、最小値からなる画像 I_{min} をそれぞれ作成する。これより、単一散乱のみからなる画像 I_1 と、多重散乱のみからなる画像 $I_M = \sum_{k=2}^{\infty} I_k$ は、Nayar ら [20] と同様に次式で推定できる。

$$I_1 = I_{max} - I_{min}, \quad (7)$$

$$I_M = 2I_{min}. \quad (8)$$

このようにして、単一散乱と多重散乱を安定的に分離する。

4.3 単一散乱の解析

単一散乱は、光源とカメラの間で光線が一度だけ反射することによって生じるため、その光路は一意に決定できる。また、光線の強度はその光路長に対して指数関数的に減衰するため、光路に沿った明るさに対して指数関数を当てはめる。

ここで、入射点から距離 d だけ離れた位置における画像 I_1 の輝度値を $s(d)$ とすると、消滅係数 σ_t は次式のように指数関数と $s(d)$ の誤差が最小となるように求められる。

$$\arg \min_{c, \sigma_t} \|s(d) - ce^{-\sigma_t d}\|_2 \quad (9)$$

ここで、 c は指数関数のスケールパラメータである。

単一散乱によって生じる光線空間 L_1 は、光源から発せられた光線の強度が光路に沿って指数関数的に減衰するという現象だけを記述すればよい。そのため、 L_1 は定数倍の不定性を残して容易に推定できる。

4.4 多重散乱の解析

次に、より高次の多重散乱を再帰的に解析する。この時点では、散乱の等方性を表すパラメータ g と散乱係数 σ_s は未知である。提案手法では、散乱係数は各反射回数ごとの光線空間の強度のみを変化させ、その空間的な分布自体には影響を与えないという性質を利用して多重散乱を効率的に解析する。

まず、散乱係数を仮に $\sigma_s = 1$ とする。散乱の等方性を表すパラメータ g の範囲は $-1 \leq g \leq 1$ であるため、適当な刻み幅で g の値を変えながら、2次反射の光線空間 L_2 の候補 $L_2^{(g)}$ を計算する。より高次の k 次反射の光線空間 $L_k^{(g)}$ とそれに対応する画像 $I_k^{(g)}$ も、式 (1) に基づいて反射後の強度を算出することで、再帰的に求められる。

次に、予測した高次の反射成分と、4.2 節で分離した実際の多重散乱 I_M との誤差が最小となるように、散乱の等方性を表すパラメータ g と散乱係数 σ_s を決定する。具体的な誤差関数は次式で算出される。

$$\arg \min_{\sigma_s, g} \|I_M - \sum_{k=2}^{\infty} \sigma_s^{k-1} I_k^{(g)}\|_2. \quad (10)$$

ここで、散乱係数 σ_s は、 k 次反射の画像 $I_k^{(g)}$ とその光線空間 $L_k^{(g)}$ には影響を与えず、各反射に対応する線形結合の係数のみに用いられることが重要である。すなわち、あらかじめ散乱係数を固定して各次数の散乱成分に対応する光線空間をレンダリングしておき、後で散乱係数を容易に変更できるというアプローチは、解析のために特化したレンダリング方法である。そのため、複数のパラメータを同時に変えながら探索する必要がなくなるので効率が良い。

このようにして、すべての反射成分からなる完全な光線空間 L は、各反射成分の総和として次式のように表される。

$$L = \sum_{k=1}^{\infty} \sigma_s^{k-1} L_k. \quad (11)$$

以上の解析により、光線空間を各反射回数ごとに分解することができ、半透明物体中でどのように散乱光が伝播していくかを可視化することが可能となる。

5. 実験結果

5.1 実験環境

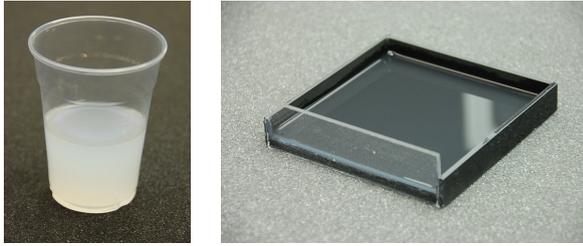
我々は、提案手法に基づいて、実際に散乱媒体中のライトトランスポートを解析した。単一散乱と多重散乱の両方が生じるように、図 8(a) に示すような水で薄めた牛乳を用いた。この液体を、図 8(b) に示すような内部が光沢のない黒色で塗装された容器に入れた。この液体の深さはおよそ 5mm 以下である。この容器は、ひとつの側面だけが透明になっており、この面からプロジェクタでパターンを投影する。

図 9 に計測のための環境を示す。プロジェクタ (3M MPro110) を容器の側面から投影できるように水面とほぼ同じ高さに配置し、水面を法線方向から観測できるようにカメラ (Point Grey Chameleon) を上方に配置した。なお、カメラとプロジェクタは簡単な位置合わせが必要であるが、その配置はさほど厳密なものではない。

5.2 単一散乱と多重散乱の分離

まず、単一散乱と多重散乱を分離する。白と黒が3画素おきに入れ替わる高周波ストライプパターンを用意し、その位相をずらしながら合計6枚の画像を撮影した。図 10(a) は撮影画像のうちの1枚であり、(b) と (c) はそれぞれ分離した単一散乱と多重散乱の成分である。

この分離の正確さを評価するために、図 11 に示すように、(a) 分離しなかった場合と、(b) 分離した単一散乱の場合の両方について、入射光の減衰の様子を調べた。このグラフは、入射点からの距離が増加するにつれて光線強度が減衰していく様子を表している。それぞれのグラフで赤線は実際の減衰の様子を、青線は指数関数を当てはめた結果を示している。分離をしなかった場合は、高次の散乱成分が含まれているため、明らかに指数関数



(a) 水で薄めた牛乳 (b) 計測のための容器

図 8 対象とした散乱媒体 .

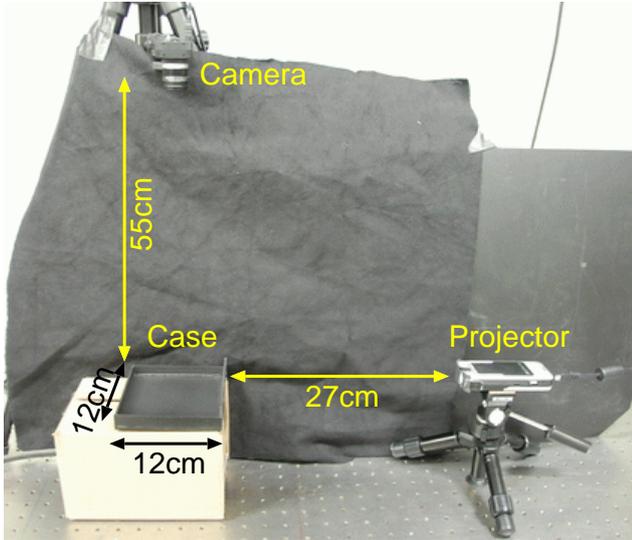
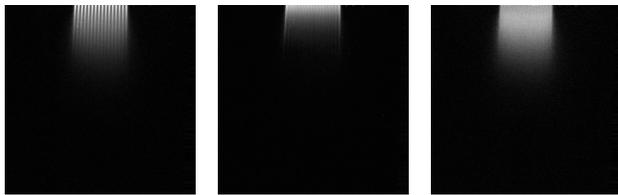


図 9 計測環境 .



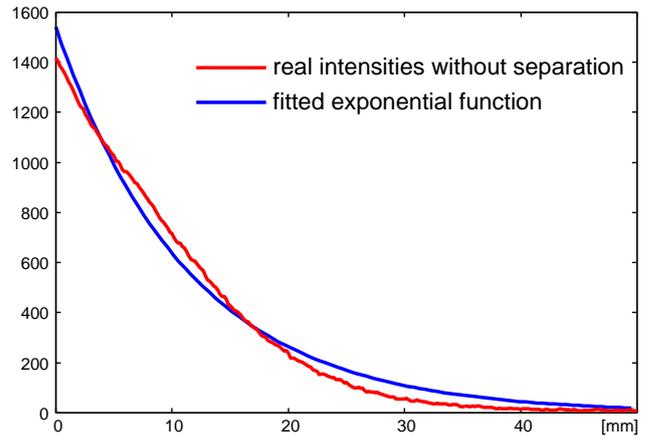
(a) (b) (c)

図 10 単一散乱と多重散乱の分離結果 . (a) 高周波ストライプパターンを投影した例, (b) 分離された単一散乱成分, (c) 分離された多重散乱成分 .

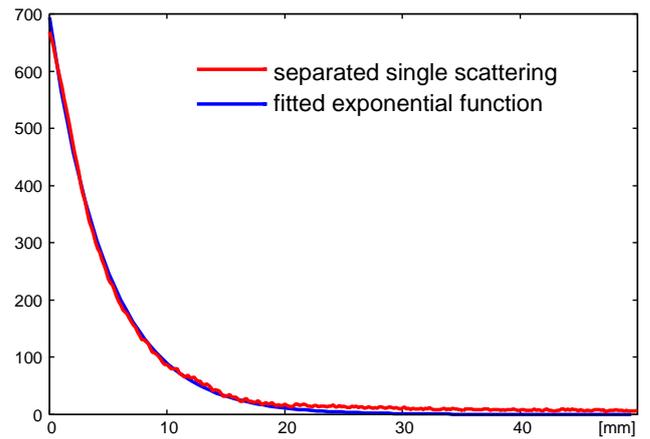
がうまく当てはめられていない . 一方 , 分離した単一散乱には , 精度よく指数関数が当てはめられていることがわかる . このことから , 分離した単一散乱成分は , ライトトランスポートのモデルに一致し , 消滅係数を効率よく推定できることがわかる . この結果より , 消滅係数 σ_t は 0.2051 と推定され , 単一散乱に相当する光線空間が推定された .

5.3 光線空間の分解

次に , 単一散乱をもとに高次の散乱成分を予測し , 実際の観測値と比較することで , 最適なパラメータ ($\sigma_a = 0.0366$, $g = 0.4$) を推定した . 図 12 は , 反射回数ごとに分解された散乱成分が , それぞれ入射点からの距離に応じてどのように減衰するかを示したものである .



(a) 分離しない場合



(b) 分離した単一散乱

図 11 入射光の減衰と指数関数の当てはめ結果 .

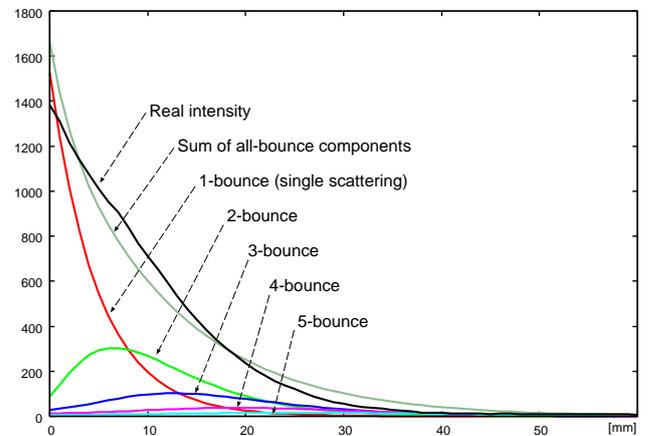


図 12 散乱光の分解結果 . 実際に観測された値が , 各次数の反射成分ごとに分解される . 高次の散乱成分は媒体内部にピークを持ち , 次数が高くなるにつれてピーク位置がより内側に移動することがわかる .

単一散乱は入射点でピークを持ち , 指数関数的に減少している . 一方 , 高次の散乱成分は媒体内部にピークを持ち , 次数が高くなるにつれてピーク位置がより内側に移動することがわかる .

最後に , 各反射回数ごとの光線空間を可視化した結果を図 13 に示す . この図では , 媒体中の各点を通過する

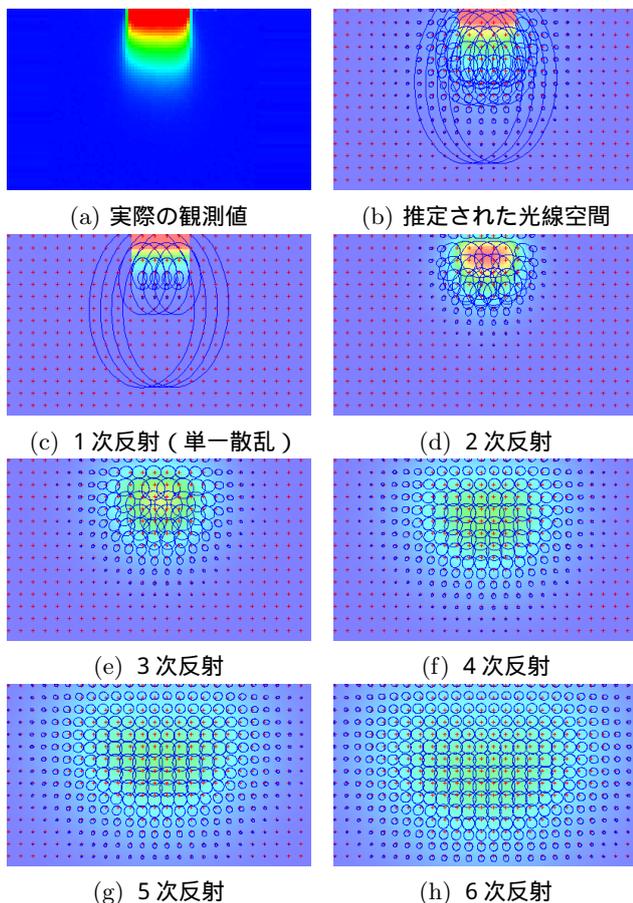


図 13 各反射回数ごとの光線空間．低次の散乱成分は指向性を持つに対して，高次になるにつれて等方的に広がる．

光線の強度の総和を擬似色で表現し，赤い「+」で示すサンプリング点を通過する光線の各方向ごとの強さを青い円形で示している．この結果より，低次の散乱成分は入射方向に沿った指向性を持っているが，高次になるにつれてほぼ等方に広がるのがわかる．この可視化により，半透明物体に入射した光が，内部でどのように散乱を繰り返す、どのように空間中に伝播していくかが明確となる．

図 14 は，入射角度を変えた場合の結果である．単一散乱の方向性は入射角度と同じであるが，高次になるにつれて入射角度との相関が低くなり，やがて入射方向に依存しないディフュージョン近似に近づいていくことがわかる．

6. 制限

3次元の光線空間：本研究では，対象とする散乱媒体を，厚みのない2次元に広がる空間に限定することで光線空間を3次元関数で記述した．3次元空間を対象とする場合は，解析，記憶容量，可視化などすべてが困難になる．

均一な媒体：散乱媒体の材質は均一であると仮定しているため，不均一な材質を取り扱うことができない．不均一な材質では，媒体中の各点ごとに散乱パラメータを求

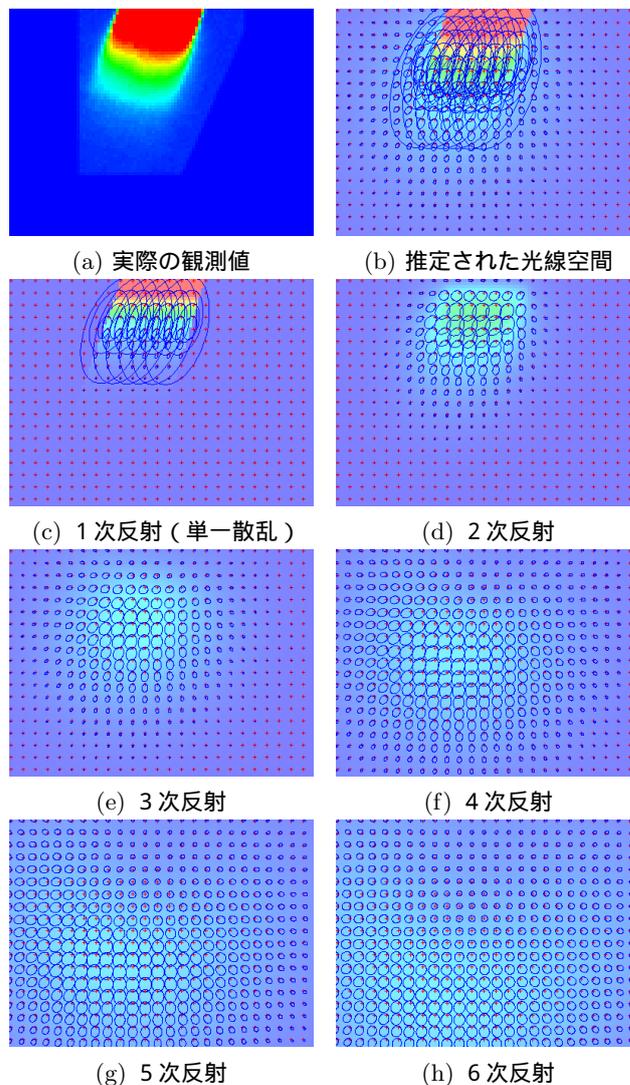


図 14 半透明物体に対して斜めから入射した場合の各反射回数ごとの光線空間．散乱を繰り返す度に指向性が低下していく様子がわかる．

める必要があり，トモグラフィのように光源を移動させながら多数の画像を撮影するなどの拡張が必要となる．
計算コスト：提案手法では，散乱係数は1秒以内に推定できるが，式(4)による光線空間の再帰的な計算では，すべての光線を実際に追跡しているため数時間を要している．高速化のためには，モンテカルロサンプリングなどの利用が考えられるが，精度と計算速度の両立は難しい．

7. まとめ

本研究では，散乱媒体に入射した光が作り出す光線空間を，反射回数ごとに分解することで，散乱光がどのように伝播していくかを可視化する手法を提案した．効率的な解析のために処理は2段階に分けられ，まず高周波ストライプパターンを投影することで，単一散乱と多重散乱が安定的に分離され，単一散乱をもとに消滅係数が求められる．次に，ライトトランスポート方程式に基づいて残りの係数が決定され，多重散乱が各反射回数ごと

の散乱成分に分解される。提案手法は、厚みのない2次元的に広がる均一な散乱媒体しか取り扱うことができないが、半透明物体中のライトトランスポートを解析するというこれまで扱われてこなかった新しい問題に挑戦した。

今後の課題として、解析結果の検証があげられる。分解した光線空間は、そもそも真値を得ること自体が難しいため直接評価することは難しいが、散乱媒体の濃度を変えた場合に推定される散乱パラメータの安定性などの評価を予定している。また、プロジェクトからの投影方法をさらに工夫することで、不均一な散乱媒体を解析できるよう拡張することも重要である。

なお、本研究は、マイクロソフトリサーチ CORE5 プロジェクト、および科研費(21680017)の助成を受けたものである。

文 献

- [1] S. G. Narasimhan, M. Gupta, C. Donner, R. Ramamoorthi, S. K. Nayar, and H. W. Jensen, "Acquiring scattering properties of participating media by dilution", Proc. SIGGRAPH2006, pp.1003-1012, 2006.
- [2] J. Gu, S. K. Nayar, E. Grinspun, P. N. Belhumeur and R. Ramamoorthi, "Compressive Structured Light for Recovering Inhomogeneous Participating Media", Proc. ECCV2008, pp.845-858, 2008.
- [3] T. Hawkins, P. Einarsson, and P. Debevec, "Acquisition of Time-Varying Participating Media", Proc. SIGGRAPH2005, pp.812-815, 2005.
- [4] J. Stam, "Multiple scattering as a diffusion process", Proc. Eurographics Rendering Workshop, 1995.
- [5] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, "A Practical Model for Subsurface Light Transport", Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.
- [6] C. Donner H. W. Jensen, "Light Diffusion in Multi-Layered Translucent Materials", Proc. SIGGRAPH2005, pp.1032-1039, 2005.
- [7] C. Donner, J. Lawrence, R. Ramamoorthi, T. Hachisuka, H. W. Jensen, and S. Nayar, "An empirical BSSRDF model", Proc. SIGGRAPH2009, pp.1-10, 2009.
- [8] M. Goesele, H. P. A. Lensch, J. Lang, C. Fuchs, and H. P. Seidel, "Disco - Acquisition of Translucent Objects", Proc. SIGGRAPH2004, pp.835-844, 2004.
- [9] S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec, and G. Turk, "Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters", Vision, Modeling, and Visualization (VMV2006), 2006.
- [10] T. Weyrich, W. Matusik, H. Pfister, B. Bickel, C. Donner, C. Tu, J. McAndless, J. Lee, A. Ngan, H. W. Jensen, and M. Gross, "Analysis of Human Faces using a Measurement-Based Skin Reflectance Model", Proc. SIGGRAPH2006, pp.1013-1024, 2006.
- [11] Y. Mukaigawa, K. Suzuki, and Y. Yagi, "Analysis of Subsurface Scattering based on Dipole Approximation", IPSJ TCVA, Vol.1, pp.128-138, 2009.
- [12] S. M. Seitz, Y. Matsushita, and K. N. Kutulakos, "A Theory of Inverse Light Transport", Proc. ICCV2005, pp.1440-1447, 2005.
- [13] N. Tsumura, N. Ojima, K. Sato, M. Shiraishi, H. Shimizu, H. Nabeshima, S. Akazaki, K. Hori, and Y. Miyake, "Image-based skin color and texture analysis/synthesis by extracting hemoglobin and melanin information in the skin", Proc. SIGGRAPH2003, pp.770-779, 2003.
- [14] N. Tsumura, R. Usuba, K. Takase, T. Nakaguchi, N. Ojima, N. Komeda, and Y. Miyake, "Image-based control of skin translucency", Proc. CGIV2006, pp.8-11, 2006.
- [15] A. Ghosh, T. Hawkins, P. Peers, S. Frederiksen, and P. Debevec, "Practical Modeling and Acquisition of Layered Facial Reflectance", Proc. SIGGRAPH Asia 2008.
- [16] C. Donner, T. Weyrich, E. d'Eon, R. Ramamoorthi, S. Rusinkiewicz, "A Layered, Heterogeneous Reflectance Model for Acquiring and Rendering Human Skin", Proc. SIGGRAPH Asia 2008.
- [17] D. A. Boas, D. H. Brooks, E. L. Miller, C. A. DiMarzio, M. Kilmer, R. J. Gaudette, and Q. Zhang, "Imaging the body with diffuse optical tomography", IEEE Signal Processing Magazine, Vol.18, Issue 6, pp.57-75, 2001.
- [18] A. P. Gibson, J. C. Hebden, and S. R. Arridge, "Recent advances in diffuse optical imaging", Phys. Med. Biol. 50, R1-R43, 2005.
- [19] A. D. Klose and A. H. Hielscher, "Iterative reconstruction scheme for optical tomography based on the equation of radiative transfer", Med. Phys. Vol.26, Issue 8, pp.1698-1707, 1999.
- [20] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, "Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination", Proc. SIGGRAPH2006, pp.935-944, 2006.