

# 単一散乱強度に基づく半透明物体の形状と散乱特性の同時推定

井下 智加<sup>†</sup> 向川 康博<sup>†</sup> 八木 康史<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 産業科学研究所

〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

E-mail: †{inoshita,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

**あらまし** 半透明物体の形状計測は、表面に入射した光が物体内で強く散乱するために難しいとされてきたが、散乱の中でも比較的扱いやすい単一散乱を手がかりとする手法により計測が可能となった。本研究では、この手法に対して物体表面での屈折の影響を組み込んだ定式化による厳密な形状推定を提案する。形状推定においては形状と散乱特性が共に未知であるため、評価関数の最小化の枠組みにおいて全てのパラメータの同時推定を行う。さらに、評価関数の最小化において適切な初期値を与えることで解探索の収束速度の向上を目指す。合成及び実データを用いた実験により屈折を考慮する本手法を適用することで形状の推定精度が向上することを確認した。

**キーワード** 単一散乱, 散乱解析, 形状推定, 半透明物体

## 1. はじめに

3次元形状の計測技術は工場における製品の外観検査、美術品のデジタルアーカイブ、CGモデリングなど、幅広い分野で利用されている。これまで、物体の形状計測として三角測量の原理に基づく幾何学的手法 [1]、画像中で観測される明るさに基づいた計測手法などが提案されてきた。特に後者は Shape-from-Intensity と称され、拡散反射 [2] [3]、鏡面反射 [4] [5]、画像中のぼけ [6] [7] などの様々な光学現象が形状計測の手がかりとして利用されてきた。しかし、我々の身の回りに存在するプラスチックやろうそく、宝石類などの半透明物体においては、表面における反射のみでなく、入射した光が物体内部で広がる散乱現象が起こるため、前述の手法を適用することができない。

それに対して近年、我々は物体内の単一散乱強度の減衰に基づく半透明物体の形状推定手法を提案した [8]。単一散乱は物体中において入射光が物体中の微粒子と一回だけ衝突することで起こる散乱であり、物体中での光路の特定や光路長に応じた減衰の解析が比較的容易である特徴を持つ。散乱は複雑な現象であるため、コンピュータビジョンの分野ではあまり議論がなされておらず、ノイズのように邪魔なものとして扱われてきた。そのため、我々の散乱現象を手がかりとする手法は新しい原理であり、これまで計測が困難であった強い散乱光が生じる半透明物体の形状推定を可能としている。しかし、この手法においては物体表面における屈折の影響を無視した定式化のために、厳密な形状推定は行えていなかった。

そこで本研究では、物体表面における屈折の影響も考慮した形状推定により、厳密な解を求める手法を提案する。まず、物体中の単一散乱モデルに対して物体表面における屈折のふるまいを組み込み、観測される単一散乱

強度の厳密な定式化を行う。また、形状推定においては散乱特性をあらかじめ知る必要があるが、観測した単一散乱を用いた評価関数の最小化の枠組みにおいて形状との同時推定を行うことにより、散乱特性が未知の場合でも形状推定が可能である。

## 2. 関連研究

**半透明物体の形状推定:** 物体の形状計測の一手法である位相シフト法は比較的散乱光に強い計測手法とされているが、Holroyd と Lawrence [9] は散乱が強くなるほど計測誤差が大きくなることを示している。それに加え、物体中における散乱は複雑な現象でもあるため、これまでの形状計測においては様々な手法で除去されてきた。Chen ら [10] は位相シフト法に散乱を減少させる偏光板を組み合わせ、高精度な形状計測を行った。Goesele ら [11] は半透明物体のモデリングにおいて、物体の表面に細かい粉をまぶし、散乱光を除去した。Gupta ら [12] は位相シフトの投影パターンを工夫し、物体内における散乱に頑健な計測を行った。

このように、散乱除去による半透明物体の形状推定は行われているが、物体中における散乱を手がかりとする手法はほとんど存在していない。

**単一散乱の解析:** 最近では、比較的扱いやすい単一散乱に着目して散乱解析を行う研究も存在している。Mukaigawa ら [13] は光源にプロジェクタを用いることで抽出した単一散乱に基づき、物体内の散乱を反射回数ごとに分解した。Narasimhan ら [14] は散乱媒体を薄めることで単一散乱しか生じないと仮定し、様々な媒体の散乱特性の推定を行なっている。また、Florescu ら [15] は光輸送方程式に基づく物体中の単一散乱を用いた光トモグラフィーを適用し、3次元ボリューム中の吸収係数の分布を推定している。さらに、光学的に薄い散乱媒体で

ある煙や水に垂らした牛乳などの空間的分布を推定する手法も提案されている [16] [17].

本研究においても同様に単一散乱に着目した解析を行っている。しかし、本研究で目標とするのは物体の形状推定であり、ここで挙げた他の研究とは目的が異なる。

### 3. 物体内部における単一散乱

#### 3.1 単一散乱のモデル

半透明物体へ入射した光は物体内の微粒子と衝突し、散乱を起こす。単一散乱はその散乱の中でも微粒子との衝突回数が一回のみの現象であり、式 (1) のようにモデル化される [8].

$$I = sp(g, \theta)e^{-\sigma_t l} \quad (1)$$

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

ここで、 $s$  は入射時の光の強さを表すスケーリング定数、 $\sigma_t$  は光の減衰の強さを示す消滅係数、 $l$  は媒体内における光路長、 $p(g, \theta)$  は光が微粒子に当たったときの散乱の偏りを示すフェーズ関数を表す。フェーズ関数は光が入射する媒体に依存する関数であるが、ここでは海洋・霧・皮膚・生体などの幅広い媒体の光の広がりやの表現に利用されている Henyey Greenstein フェーズ関数 (HG 関数) [18] を採用する。HG 関数は式 (2) で表され、散乱の偏りを決める散乱パラメータ  $g$  ( $-1 \leq g \leq 1$ ) により特徴づけられる。

#### 3.2 物体内部における単一散乱の定式化

本節では物体内部における単一散乱の定式化を行う。図 1 に示すのは本研究における撮影環境である。照明は物体の側面に設置し、上方に設置したカメラにより物体内の散乱を観察する。照明と観測系はともに平行光を仮定し、計測対象物体は光学的に一樣であるとする。また、定式化において単一散乱以外の成分は生じないと仮定する。

図 2 に示すのは物体中における単一散乱の光路である。物体内部において入射光は散乱点  $(x', y')$  において散乱し、位置  $(x, y)$  における物体表面に到達し出射する。我々の目的は、位置  $(x, y)$  にて観測した単一散乱の強度  $I(x, y)$  から入射光の高さが  $z = 0$  の場合における半透明物体の高さ  $h(x, y)$ 、散乱特性を表すスケーリング定数  $s$ 、フェーズ関数パラメータ  $g$ 、消滅係数  $\sigma_t$  を推定することである。 $\mathbf{n}(x, y)$  は物体表面の法線、 $\mathbf{i}_x = [1, 0, 0]^T$  は入射ベクトル、 $\mathbf{i}_z = [0, 0, 1]^T$  は出射ベクトルを表す。 $\mathbf{r}(x, y)$  は散乱点  $(x', y')$  から物体表面の位置  $(x, y)$  までの方向を表す単位散乱ベクトルである。 $\theta_p$  は入射ベクトル  $\mathbf{i}_x$  と散乱ベクトル  $\mathbf{r}(x, y)$  の間の角度、 $\theta_r$  は散乱ベクトル  $\mathbf{r}(x, y)$  と出射ベクトル  $\mathbf{i}_z$  の 2 つが共有する平面に  $\theta_p$  を射影した角度である。物体表面における屈折は式 (3) で表されるスネルの法則に従う。

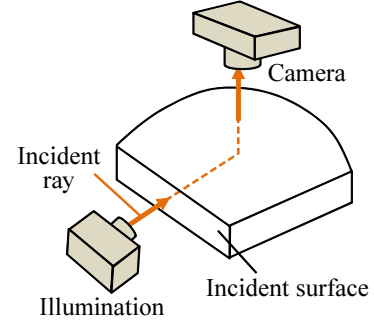


図 1 形状推定のセッティング

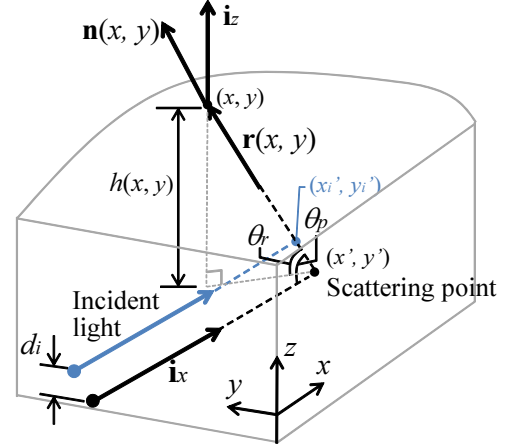


図 2 半透明物体内部における光路

$$\mathbf{n}(x, y) \times \mathbf{i}_z = \eta \mathbf{n}(x, y) \times \mathbf{r}(x, y) \quad (3)$$

ここで、 $\eta$  は物体の屈折率、 $\times$  はベクトルの外積を表す。物体内部における単一散乱の光路長は、入射点から散乱点までの距離  $x'$  と散乱点から物体表面までの距離  $h(x, y)/\sin \theta_r$  の和であり、観測される単一散乱の強度は式 (1) に基づき、式 (4) のように表される。

$$I(x, y) = s F_t^{in} F_t^{out}(x, y) p(g, \theta_p) e^{-\sigma_t (x' + \frac{h(x, y)}{\sin \theta_r})} \quad (4)$$

ここで、 $F_t^{out}(x, y)$  は位置  $(x, y)$  での出射におけるフレネル透過項、 $F_t^{in}$  は入射面におけるフレネル透過項を表す。入射光は入射面に対して垂直に入射すると仮定していることから、入射面でのフレネル透過率は位置によらない定数とする。

### 4. 形状と散乱特性の同時推定

前節においては物体内部における単一散乱に着目し、観測強度がどのようにモデル化されるのかを見てきた。本節では、観測強度に関わる形状と散乱特性の推定手法について述べる。なお、屈折率  $\eta$  はリフラクティビティ等によって直接計測することもできるため、本研究ではあらかじめ既知の値とする。

#### 4.1 同時推定の原理

本章の冒頭にも述べたように、物体の形状と散乱特性

は、観測される散乱強度に関して互いに依存関係にあるため独立に推定することができない。そのため、形状と散乱特性を同時に推定する必要がある。本研究においては、評価関数最小化の枠組みにおいて形状と散乱特性の同時推定を行う。

正しく推定された散乱特性と物体の形状から計算される単一散乱強度は、観測される単一散乱強度  $I(x, y)$  と等しくなる。そのため、形状と散乱特性の探索において、モデルから得られる単一散乱が観測強度と一致するとき正しい解となる。しかし、観測強度の数より多くの変数を推定しなければいけないため、解探索は不良設定問題となる。これに対し、我々は入射光の高さを変化させながら撮影した  $n$  ( $2 \leq n$ ) 枚の画像を用いることにより、拘束条件を増やし、正しい解の探索を行う。入射光の高さは図 2 に示すように  $z = d_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) だけ変化させ、複数の単一散乱強度  $I_i(x, y)$  を観測する。それぞれの入射の高さにおいて得られる強度は式 (5) により表される。

$$I_i(x, y) = sF_t^{in}F_t^{out}(x, y)p(g, \theta_p)e^{-\sigma_t(x'_t + \frac{h(x, y) - d_i}{\sin \theta_p})} \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

一方で、観測強度は形状推定の手がかりとして使用するため、S/N 比も考慮しなければならない。ノイズ強度が一定であるとすると、観測強度が強い場合、ノイズの割合は相対的に小さくなる。そこで、未知数を推定するにあたり、観測強度に基づいた重み付けを導入することでノイズの影響を軽減させる。これらから、形状  $h(x, y)$  と散乱特性パラメータ  $s, g, \sigma_t$  を推定する評価関数は式 (6) のように設定できる。

$$E(h(x, y), s, g, \sigma_t) = \sum_i w_i \sum_{x, y} (I_i(x, y) - I_i^{gen}(h(x, y), s, g, \sigma_t))^2 \quad (6)$$

$I_i^{gen}$  は式 (5) に基づいて計算した単一散乱強度、 $w_i$  は観測ノイズの影響を抑えるための重みである。この重み  $w_i$  は式 (7) で表される。

$$w_i = \frac{\sum_{x, y} I_i(x, y)}{\sum_{k=1}^n \sum_{x, y} I_k(x, y)} \quad (7)$$

評価関数  $E$  は、観測強度と式 (5) により計算される強度の距離を評価するものである。そのため評価関数  $E$  を最小化する物体の高さ  $h(x, y)$  と散乱パラメータ  $s, g, \sigma_t$  が求める解となる。

$$\{h(x, y), s, g, \sigma_t\} = \underset{h(x, y), s, g, \sigma_t}{\operatorname{argmin}} E(h(x, y), s, g, \sigma_t) \quad (8)$$

## 4.2 同時推定における最適化問題

本節では形状と散乱特性の同時推定における評価関数の最適化手法について述べる。形状と散乱特性の推定にあたり、最小化の対象となる式 (6) の評価関数は未知変

数に対して非凸関数であり、線形的に解くことはできない。そのため、非線形最適化を適用することで、最適解を求める。以降、最適化における初期値の設定、及び適用する最適化手法について述べる。

### a) 初期形状の推定

非線形最適化においては、解の収束を早めるために適切な初期値を与える必要がある。物体の形状は物体中の光路に依存するが、その光路も物体に依存してしまうため、あらかじめ知ることができない。そこで、我々が [8] で提案した物体表面での屈折を無視することで求めた形状を、パラメータ推定における初期値として使用する。物体表面上での屈折を無視する場合、散乱ベクトル  $\mathbf{r}(x, y)$  は出射ベクトル  $\mathbf{i}_z$  と一致し、散乱点  $(x', y')$  は位置  $(x, y)$  と一致する。また、物体表面におけるフレネル透過  $F_t^{out}(x, y)$  も定数となる。さらに、単一散乱は垂直に散乱することから  $\theta_p$  は  $\pi/2$  に固定され、フェーズ関数  $p(g, \theta_p)$  も定数となる。以上から、初期形状  $h^0(x, y)$  における単一散乱の強度は式 (9) により表される。

$$I_i^0(x, y) = S e^{-\sigma_t(h^0(x, y) + x - d_i)} \quad S = sF_t^{in}F_t^{out}p\left(g, \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

ここで、式 (9) の両辺の対数を取り、 $h^0(x, y)$  について整理することで式 (10) が得られる。この式に対し、消滅係数  $\sigma_t$  とスケール定数  $S$  を与えることで初期形状が求められる。

$$h^0(x, y) = \frac{1}{\sigma_t} (\log S - \log I_i(x, y)) - x + d_i, \quad (10)$$

消滅係数  $\sigma_t$  は入射光の高さを  $d_i, d_j$  (ただし  $d_i \neq d_j$ ) と変化させた二組の観測強度  $I_i(x, y)$  と  $I_j(x, y)$  により式 (11) のように計算される。

$$\sigma_t = \frac{\log I_i(x, y) - \log I_j(x, y)}{d_i - d_j} \quad (11)$$

ノイズ低減のため、初期値にはすべての  $d_i, d_j$  の組から得られる消滅係数  $\sigma_t$  の平均値を用いる。スケール定数  $S$  の初期値には、減衰の起こっていない入射位置における観測強度を採用する。これらの値を代入することで得られる形状  $h^0(x, y)$  を最適化における初期値として与える。

### b) 最適化手法

前段階で求めた形状  $h^0(x, y)$  を関数最適化における初期値とし、高さ  $h(x, y)$ 、スケール定数  $s$ 、フェーズ関数のパラメータ  $g$ 、及び消滅係数  $\sigma_t$  を求める。関数の最適化において、評価関数である式 (6) は多くの局所解を持つおそれがある。そこで、本研究では 2 段階の最適化を適用することで解を求める。はじめに、大域的最適化手法である粒子群最適化 [19] を用いて、大まかな探索範囲を決定する。次に、Nelder-Mead 法 [20] を適用し、より厳密な最適解を求める。ここで、式 (6) における単

一散乱強度  $I_i^{gen}(h(x, y), s, g, \sigma_t)$  の計算では形状から求めた法線が必要となるが、高さの誤差の影響を小さくするために本研究では注目画素を中心とする  $3 \times 3$  の範囲において平滑化を行った法線から単一散乱の強度を求めている。

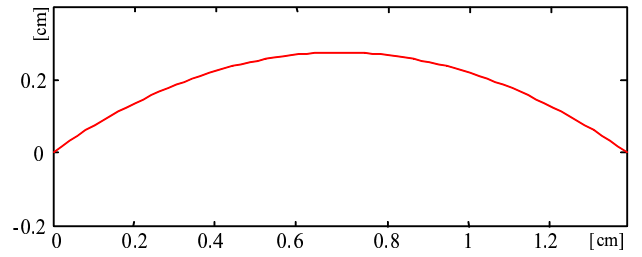
## 5. 実験結果と適用範囲

### 5.1 合成データによる実験

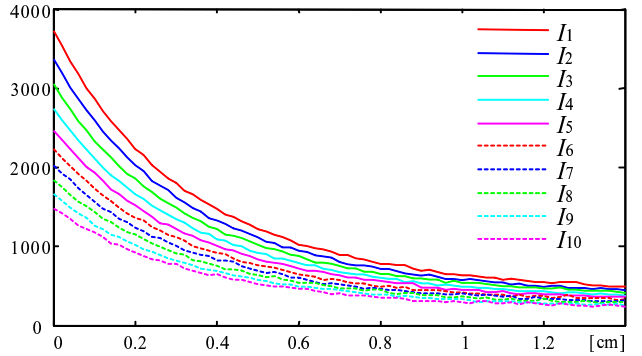
まず、提案手法の有効性を確かめるため、合成データを用いた実験を行った。実験においては曲線、不連続な直線で構成された1次元の形状、及びピラミッド型の2次元の形状を用いた。それぞれの形状に対して式(5)を適用して合成した強度を用いて深度の推定を行う。合成においては、照明の入射位置を  $z = 0$  から  $0.02[\text{cm}]$  ずつ10段階変化させ、観測ノイズとしてガウシアンノイズ(平均  $\mu = 0$ , 分散  $\sigma = 0, 5, 10, 15, 20$ ) を5段階のレベルで付加した。散乱パラメータ群は  $g = 0.1$ ,  $\sigma_t = 1.5$ ,  $s = 50000$ , 屈折率は  $\eta = 1.2$  と設定した。

まず、図3(a)に示す左右対称な曲線の形状に対し、実験を行った。この形状と散乱パラメータから合成した単一散乱強度は図3(b)であり、平均  $\mu = 0$ , 分散  $\sigma = 10$  のガウシアンノイズを付加している。提案手法により形状推定を行った結果を図3(c)に示す。屈折を無視することで求めた初期形状は真値に対し全体的に歪み、さらにノイズが含まれている。特にガウシアンノイズの分散値が  $\sigma = 15, 20$  と大きい場合、観測強度に対するノイズの割合が大きくなるため、推定形状に含まれるノイズが目立つ。最適化により求めた形状においても同様にノイズの影響が残っているが、真値とほぼ同じ形状が推定されている。表1に示すのは推定した散乱パラメータ群と推定形状のRMSEである。観測強度に対するガウシアンノイズが小さい場合、スケーリング定数  $s$  と消滅係数  $\sigma_t$  は真値に近い値が求められている。しかし、フェーズ関数のパラメータ  $g$  は真値とは異なる値となっている。 $g$  は散乱の広がり制御するパラメータであり、フェーズ関数を介して物体の形状、単一散乱のスケールの両方に影響を与える。しかし、本研究で採用しているHG関数の場合、真値  $g = 0.1$  に対して実験で得られた  $g = 0.069, 0.007, 0.002, -0.002, 0.003$  はフェーズ関数の値としての違いはあまり大きくなく、特に物体表面に向かう散乱角 ( $\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$ ) の範囲における相対誤差の平均は約8%未満である。そのため、パラメータ  $g$  の厳密な推定は、他パラメータの推定より難しいものとなる。

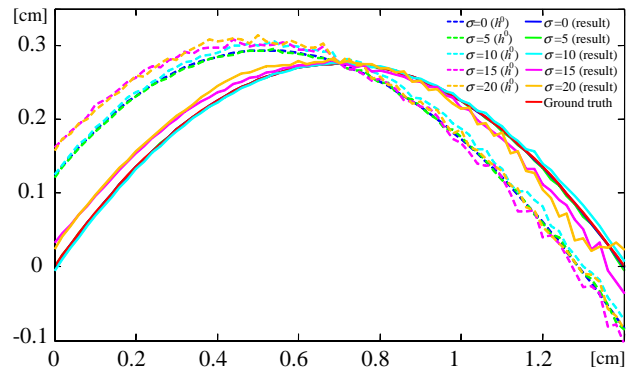
図4に示すのは不連続な直線により構成された推定対象形状、合成した観測強度(ガウシアンノイズ:  $\sigma = 10$ )、及び観測強度からの推定結果である。不連続に変化する部分においては、法線も不連続に変化するため、観測強度の変化も激しく、初期形状においてもスパイク状の誤差が発生している。しかし、最適化後の形状においては誤差も無くなり、真値とほぼ同じ形状が得られている。



(a) 推定対象形状



(b) 合成した単一散乱強度



(c) 各ノイズレベルにおける形状推定結果

図3 左右対称な曲線の形状に対する推定結果

推定した散乱パラメータ群も  $s = 4.89 \times 10^4$ ,  $g = 0.044$ ,  $\sigma_t = 1.50$  であり、曲線を用いた実験と同様に  $s$ ,  $\sigma_t$  は真値に近いパラメータが推定されている。

図5に示すのはピラミッド型の2次元形状に対して実験を行った結果である。(a)に示すのは推定対象形状であり、(b)は形状と散乱パラメータから合成した観測強度、(c)は初期形状、(d)が最終的な推定結果である。初期形状においては形状が不連続に変化するため、山の尾根の部分における形状が特に真値と異なっている。しかし、最終的な推定結果においては、ノイズが残っているものの、山の尾根の部分の誤差が小さくなっており、真値と同様にエッジ部分の平面の変化がなめらかになっている。推定した散乱パラメータ群は  $s = 4.33 \times 10^4$ ,  $g = 0.025$ ,  $\sigma_t = 1.47$  であり、他の結果と同様に真値と近いパラメータが推定されている。

本実験において、観測ノイズが大きい場合の推定精度はやや低下するが、真値と同様の形状、散乱パラメータ群が推定されていることが確かめられた。一方、フェー



表 1 各ノイズレベルにおける推定散乱パラメータと推定形状の RMSE

	スケール定数 $s$	散乱パラメータ $g$	消滅係数 $\sigma_t$	推定形状の RMSE
$\sigma = 0$	$5.08 \times 10^4$	0.069	1.50	$0.05 \times 10^{-2}$
$\sigma = 5$	$4.95 \times 10^4$	0.007	1.50	$0.15 \times 10^{-2}$
$\sigma = 10$	$4.95 \times 10^4$	0.002	1.50	$0.42 \times 10^{-2}$
$\sigma = 15$	$6.09 \times 10^4$	-0.002	1.60	$1.64 \times 10^{-2}$
$\sigma = 20$	$6.33 \times 10^4$	0.003	1.61	$1.90 \times 10^{-2}$

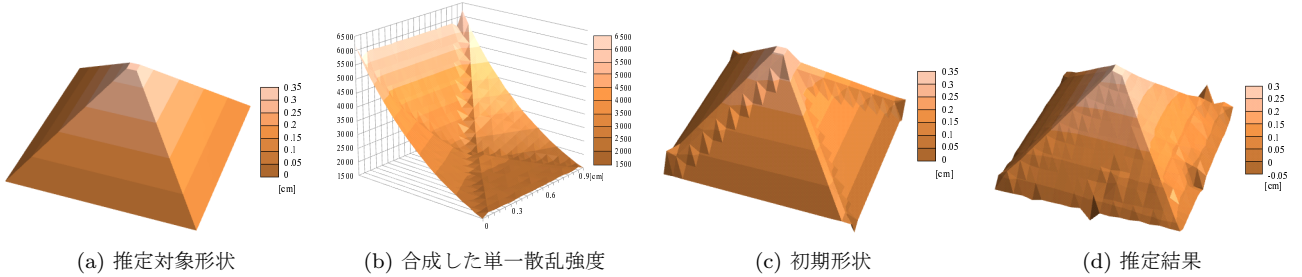
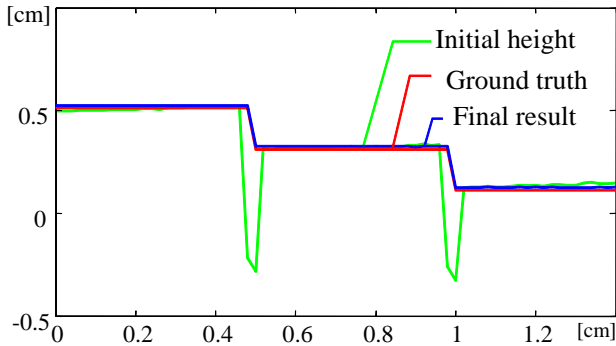
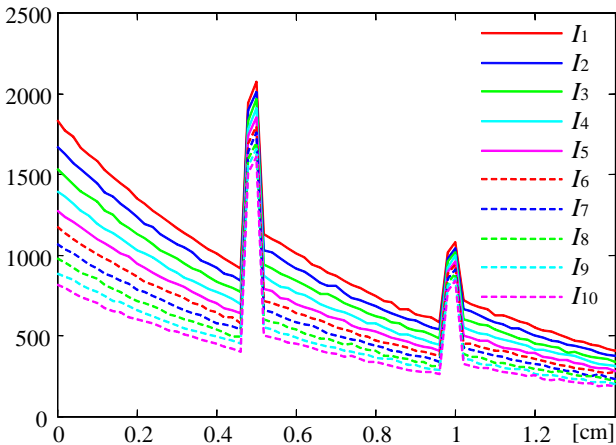


図 5 ピラミッド型の 2 次元形状に対する形状推定結果



(a) 推定対象形状と推定結果



(b) 合成した単一散乱強度

図 4 不連続な形状に対する形状推定結果

ズ関数のパラメータ  $g$  はその性質上、精度良く推定することが難しいことも確かめられた。

## 5.2 実データによる実験

次に、実環境において観測した単一散乱からの深度推定を行い、提案手法の有効性を確かめた。図 6 に示すのは図 1 のセッティングに基づき構成した実験環境であ

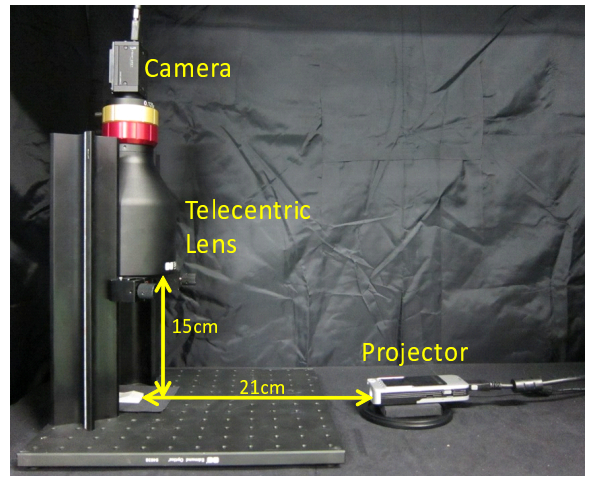
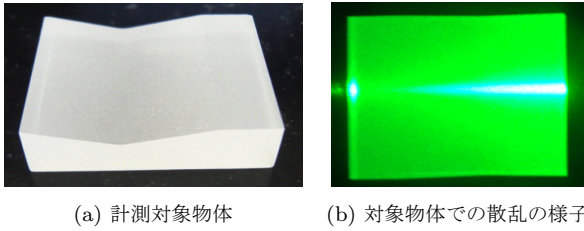


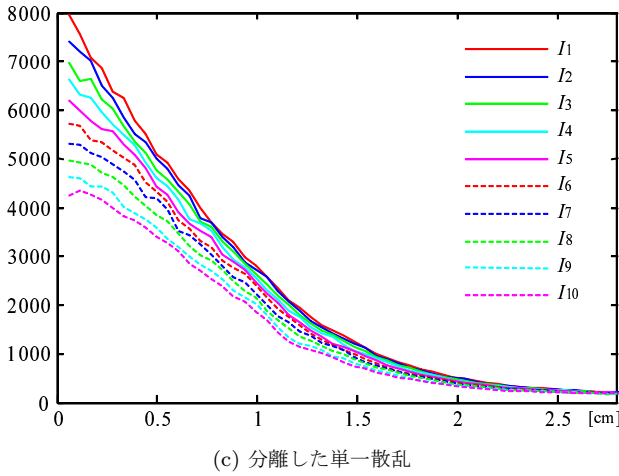
図 6 実験環境

る。光源であるプロジェクタ (3M MPro110) を物体の側面に設置し、カメラ (Point Grey Grasshopper) を上部に設置した。カメラのレンズにはテレセントリックレンズ (Edmund Optics) を使用し、観測系の平行射影を厳密に仮定できる環境にした。

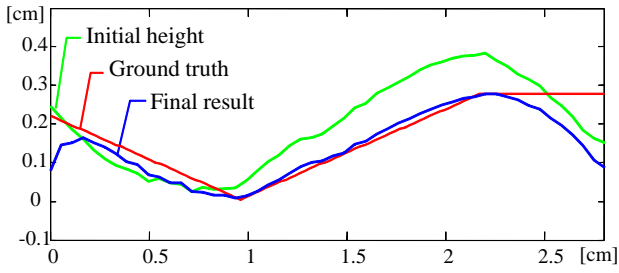
本実験における計測対象には谷型の形状、山形の形状を持つ白濁したプラスチックを用いた。これらは図 7(b) のような散乱を示す物体であり、単一散乱のみではなく、多重散乱成分も観測される。そこで、高周波パターン投影による単一散乱の抽出 [8] を行い、提案手法を適用した。本研究では出射面での屈折を考慮しているため、物体表面における相互反射も含まれてくる。しかし、高周波パターン投影の原理上、単一散乱以外の散乱・反射現象は大域照明に分類されるため、出射面の屈折が存在する場合においても相互反射の影響は受けない。形状推定において屈折率はプラスチックの理論値である  $\eta = 1.3$  を採用し、単一散乱の観測は入射光の高さを  $0.025[\text{cm}]$  毎に 10 段階変化させて行った。



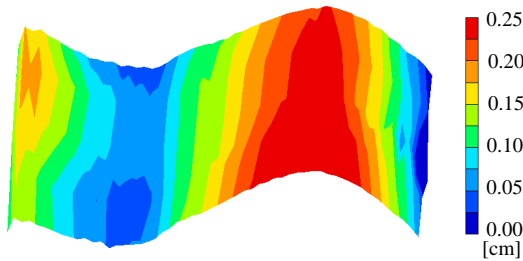
(a) 計測対象物体 (b) 対象物体での散乱の様子



(c) 分離した単一散乱



(d) 推定結果の断面プロット

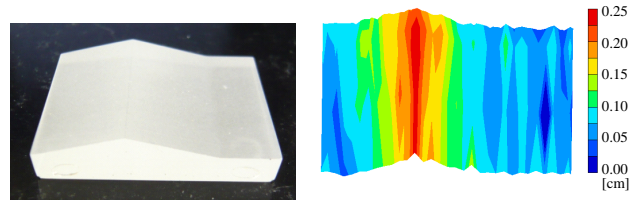


(e) 推定結果の3次元プロット

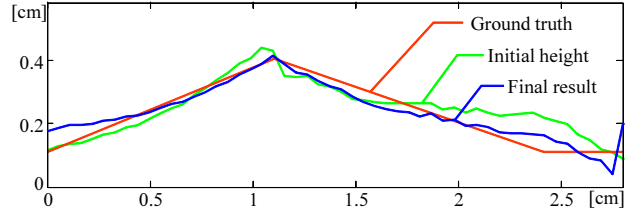
図7 谷型の物体を用いた形状推定

図7(a)に示すのは計測対象の谷型の形状であり、この物体の側面から照明を行い単一散乱を観測した。図7(c)に示すのは観測した単一散乱の強度を $x$ 軸方向にプロットしたグラフである。また、ノイズを軽減するため、 $y$ 軸方向約 $0.5[\text{cm}]$ の範囲の平均値を採用し、 $x$ 軸方向に $0.055[\text{cm}]$ 刻みの量子化を行なっている。

図7(d)は単一散乱の輝度値から形状推定を行った結果であり、屈折を考慮せずに求めた初期形状と評価関数の最適化による推定結果について、真値をそれぞれ緑色、青色、赤色で表している。初期形状は真値とある程度類似する形状として求められているが、最適化により求められる推定形状はより真値に近い形状となっている。し



(a) 計測対象物体 (b) 推定結果の3次元プロット



(c) 推定結果の断面プロット

図8 山型の物体を用いた形状推定

かし、誤差は完全にはなくなっておらず、特に $x = 2[\text{cm}]$ 以降の形状が真値と異なる値となっている。これは照明の入射位置から遠くなるほど十分な強度の単一散乱が観測できなくなってしまうためである。さらに、入射面における推定形状も真値と一致していない。これは入射面における反射により、入射位置における明るさが本来の値より明るくなってしまうためである。図7(e)は形状の推定結果を3次元プロットしたものであり、対象物体の形状がおおまかに推定できていることが確認できる。推定した散乱パラメータ群は $s = 1.21 \times 10^4$ 、 $g = 0.042$ 、及び $\sigma_t = 1.3244$ である。

山型の形状に対しても同様の形状推定実験を行った結果を図8に示す。図8(b)に示すのは推定結果の3次元プロットであり、計測対象の形状がおおまかに推定できていることが確認できる。山の頂においては形状が不連続に変化するため、法線も不連続になるが、物体全体の形状がほぼ正しく推定されている。また図8(c)に示すのは断面のプロットであり、屈折を考慮せずに求めた初期形状に対し、評価関数の最適化により求めた形状がより真値に近づいていることが確認できる。推定した散乱パラメータ群は $s = 1.27 \times 10^4$ 、 $g = -0.083$ 、及び $\sigma_t = 1.43$ であり、谷型の形状とほぼ同じ値が推定された。

本実験において、屈折を考慮しない初期形状に対し、提案手法により求めた推定結果の方が真値に近い形状が求められることが確認できた。また、推定した散乱パラメータについても、同じ素材から作られた形状の異なる物体に対してほぼ同じ値が得られたため、形状と散乱特性の同時推定が正しく行われていることも確認できた。

### 5.3 適用範囲

提案手法においては以下のような制限事項がある。

**計測対象の形状:** 提案手法における問題設定において、計測物体の入射面はほぼ平面であり、物体内における入射光は $x$ 軸に平行であると仮定している。これは高周

波パターンを用いた単一散乱の分離において、物体への入射面の形状が自由形状である場合、屈折により投影するパターンが干渉してしまうおそれがあるためである。そのため、一般の形状に推定手法を適用するために、形状に影響されない単一散乱の抽出手法や、光線一本一本に着目した光線追跡による形状推定などを考える必要がある。

**計測対象物の材質:** 本手法における定式化においては計測対象物は光学的に一律な材質であると仮定した。そのため、内部が不均一な物体には本手法を適用することはできない。

## 6. ま と め

本研究では、単一散乱強度に基づく形状と散乱特性の同時推定を行った。これは既存手法において考慮されていなかった屈折の影響もモデルに組み込むことで、形状推定精度の向上を目指したものである。形状推定は、屈折の影響を無視した形状を初期値とし、観測強度との近さを評価する関数を最適化する枠組みで行う。合成データ及び実際に観測した単一散乱強度を用いた実験により、屈折の影響を考慮し、散乱特性を同時推定する場合の方が形状推定精度が向上することが確かめられた。

本研究では、出射面における屈折は考慮しているが、入射面における屈折の影響は単一散乱の抽出手法の関係上、無視している。また、光学的に一律な材質を計測対象として取り扱ってきたため、光学的に不均一な物体には適用することができない。そのため、散乱抽出手法の工夫、単一散乱以外の散乱成分の利用などにより計測対象の範囲を拡大することが今後の課題である。

## 謝 辞

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端・次世代研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

## 文 献

- [1] S. B. Kang and R. Szeliski: “3-d scene data recovery using omnidirectional multibaseline stereo”, *International Journal of Computer Vision (IJCV)* (1997).
- [2] B. K. P. Horn: “Shape from shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view”, Technical report, Massachusetts Institute of Technology (1970).
- [3] R. J. Woodham: “Photometric method for determining surface orientation from multiple images”, *Optical Engineering*, **19**, 1 (1980).
- [4] G. Healey and T. O. Binford: “Local shape from specularities”, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, **42**, pp. 62–86 (1987).
- [5] A. C. Sankaranarayanan, A. Veeraraghavan, O. Tuzel and A. Agrawal: “Specular surface reconstruction from sparse reflection correspondences”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2010).
- [6] M. Watanabe and S. K. Nayar: “Rational filters for passive depth from defocus”, *International Journal on Computer Vision* (1998).
- [7] C. Zhou, O. Cossairt and S. Nayar: “Depth from diffusion”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2010).
- [8] 井下智加, 向川康博, 松下康之, 八木康史: “単一散乱からの半透明物体の形状推定”, 第14回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011) (2011).
- [9] M. Holroyd and J. Lawrence: “An analysis of using high-frequency sinusoidal illumination to measure the 3d shape of translucent objects”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2011).
- [10] T. Chen, H. P. A. Lensch, C. Fuchs and H. P. Seidel: “Polarization and phase-shifting for 3d scanning of translucent objects”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2007).
- [11] M. Goesele, H. P. A. Lensch, J. Lang, C. Fuchs and H. P. Seidel: “Disco - acquisition of translucent objects”, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 835–844 (2004).
- [12] M. Gupta, A. Agrawal, A. Veeraraghavan and S. Narasimhan: “Structured light 3d scanning under global illumination”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2011).
- [13] Y. Mukaigawa, Y. Yagi and R. Raskar: “Analysis of light transport in scattering media”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2010).
- [14] 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. ACM SIGGRAPH*, pp. 1003–1012 (2006).
- [15] L. Florescu, J. C. Schotland and V. A. Markel: “Single-scattering optical tomography”, *Physical Review E* (2009).
- [16] T. Hawkins, P. Einarsson and P. Debevec: “Acquisition of time-varying participating media”, *ACM Trans. on Graph. (ToG)*, **24**, 3 (2005).
- [17] J. Gu, S. K. Nayar and E. Grinspun: “Compressive structured light for recovering inhomogeneous participating media”, *Proc. of European Conference on Computer Vision (ECCV)* (2008).
- [18] L. G. Henyey and J. L. Greenstein: “Diffuse radiation in the galaxy”, *Astrophysical Journal* (1941).
- [19] J. Kennedy and R. C. Eberhart: “Particle swarm optimization”, *IEEE International Conference on Neural Networks* (1995).
- [20] J. A. Nelder and R. Mead: “A simplex method for function minimization”, *The Computer Journal* (1965).