

単一散乱からの半透明物体の形状推定

井下 智加[†] 向川 康博[†] 松下 康之^{††} 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所

^{††} マイクロソフト リサーチ アジア

E-mail: [†]{inoshita,mukaigaw}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{††}yasumat@microsoft.com,

^{†††}yagi@sanken.osaka-u.ac.jp

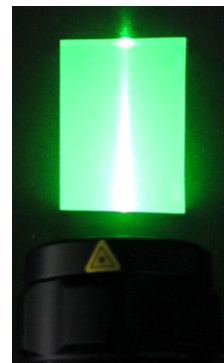
あらまし 白濁したプラスチックなどの半透明な物体に光を当てると、物体内部で光が強く散乱する。そのため、半透明物体の形状は、反射光や透過光のみを考慮した従来法では推定することは難しい。そこで本研究では、半透明物体内部で観測される単一散乱の強度に着目した新たな形状推定手法を提案する。単一散乱は、入射光が物体中で一度だけ微粒子と衝突することによって生じる現象であり、光源からカメラに至るまでの光路や、光路長に応じた減衰の解析が比較的容易である。そこで、散乱光から単一散乱成分のみを分離し、光の減衰モデルを当てはめることで形状を推定する。さらに、媒体の散乱特性と推定形状には曖昧性が生じるが、照明の入射位置をずらして複数回計測することで、曖昧性が解決できることを示す。実験により、単一散乱が物体形状を推定するための手がかりとして有用であることを確認した。

キーワード 単一散乱, 散乱解析, 半透明物体, 形状推定

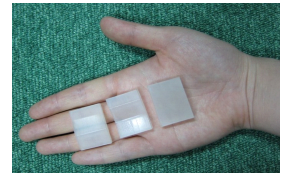
1. はじめに

我々の身の回りには、白濁したプラスチックなど、物体表面に入射した光が内部で強く散乱する半透明な物体が多く存在する。3次元形状の計測技術は一見すると成熟しているようにも見られるが、未だにこのような半透明物体の形状を測ることは難しい。対象シーンに特殊な照明が許される能動的な手法は比較的高精度に形状計測できるとされているが、半透明物体に対しては、表面に照射された光が内部で散乱してしまうため、うまく計測できない。実際、Godinら[1]はレーザレンジファインダを用いた計測手法において、大理石程度の弱い表面下散乱の場合でも、表面での反射に表面下散乱が加わって明るく観測されるため、真値にバイアスがかかり、計測誤差が生じることを実験的に確かめている。強い散乱光が観測される場合には、反射光や透過光のみを考慮した従来法では形状計測は極めて難しくなり、商用化されているレーザレンジファインダでも計測できなくなる。図1に強い散乱を引き起こす半透明物体の形状をレーザレンジファインダで計測した例を示す。図1(c)において手の形状は計測できている一方、半透明物体の正しい形状は現れていないことがわかる。

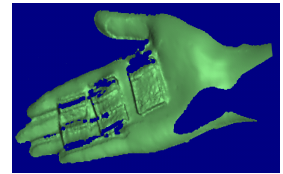
これまで、3次元形状を計測する際に観測される散乱光は、ノイズのように邪魔なものとして扱われてきた。Chenら[2]は散乱光の影響を抑えるために、比較的散乱光に強いとされる位相シフト法に、散乱光を低減する偏光板を組合せた。また、Goeseleら[3]は半透明物体のモデリングをしているが、3次元形状の計測の際には対象物体の表面に細かい粉をふりかけ、散乱光を物理的に除



(a) 計測対象物の散乱の様子



(b) 計測対象物体



(c) レーザレンジファインダによる計測結果

図1 半透明物体の形状計測の失敗例

去している。このように、散乱光は形状計測に悪影響を及ぼすため、様々な方法で除去されてきた。

それに対して、本研究では、まったく逆に散乱光そのものを手がかりとした新しい形状計測法を提案する。散乱光の中でも、単一散乱は入射光が物体中で一度だけ微粒子と衝突することによって生じる現象であり、光源からカメラに至るまでの光路や、光路長に応じた減衰の解析が比較的容易である。そこで、散乱光から単一散乱成分のみを分離し、光の減衰モデルを当てはめることで形状を推定する。半透明物体内部で観測される単一散乱の強度に着目した形状推定手法は、原理そのものが新しく、強い散乱光が観測される場合に特に有効な手法である。

2. 関連研究

明るさ解析に基づく形状推定: 参照光の投影位置や複数

視点から撮影された画像の対応点から、三角測量の原理に基づいて形状計測する幾何学的手法に対して、画像中で観測される明るさに基づいて形状計測する手法は Shape-from-intensity と総称される。これらの手法は古くから研究され、拡散反射 [4] [5]、鏡面反射 [6] [7] など、様々な光学現象が手がかりとして利用されてきた。

最近では、Zhou ら [8] が拡散板を用いて撮影された画像におけるぼけ量から被写体までの距離を推定している。また、Liao ら [9] は光のエネルギーが距離の自乗に反比例して減衰することを利用し、様々な表面特徴を持つ物体の形状推定に成功している。このように、明るさ解析に基づいた様々な形状推定手法が提案されているが、対象シーンの散乱強度そのものを手がかりとした形状推定法は見あたらない。

透明物体の形状推定: 透明物体の表面に入射した光は内部に透過するが、屈折率が既知であれば屈折光の光路は一意に特定できる。そこで、透明物体内部での光路を追跡することで形状を推定する手法が提案されている。Miyazaki と Ikeuchi [10] は、偏光レイトレーシングにより透明物体の形状を計測した。Kutulakos と Steger [11] は透過光の光路追跡に必要な視点・参照点・屈折回数から形状を推定した。Trifonov ら [12] は計測物体と同じ屈折率を持つ液体中に沈め、トモグラフィーによる推定手法を適用した。また、Hullin ら [13] は蛍光の性質を持つ液体中に入れた透明物体に対して、線光源を走査させることで得られる断面から形状を推定した。これらの手法は透過光を利用したものであるが、Morris と Kutulakos [14] は内部が不均一な透明物体でも、表面での反射光を解析することで形状を求める方法を提案している。しかし半透明物体では、表面での反射光や内部での透過光の成分は弱く、散乱光の強度が支配的であるため、これらの手法をそのまま適用することはできない。

散乱を考慮した形状推定: 散乱媒体中に置かれた不透明物体の形状計測については、様々な研究が進められている。Narasimhan ら [15] は単一散乱を考慮した構造化光投影法、および照度差ステレオ法によって、濁った液体中の物体形状を計測した。Kim ら [16] は、光線空間を解析することで散乱光を除去し、トモグラフィーによって形状を推定した。しかし、これらの手法は、散乱を生じる半透明物体の形状を計測するものではない。

一方、散乱媒体の性質を解析する研究も盛んになってきている。散乱を厳密に取り扱うためには、モンテカルロ光線追跡法 [17] などによって、入射光が散乱する過程を徹底的に追跡する必要があった。近年、Mukaigawa ら [18] は光源としてプロジェクタを用いて、散乱光を反射回数ごとに分解することで、単一散乱成分のみを抽出する手法を提案した。また、Narasimhan ら [19] は散乱媒体を水で薄めることで単一散乱しか生じないと仮定し、散乱に関するパラメータの推定を行っている。単一散乱は比較的扱いやすい現象であることから、煙や水に垂ら

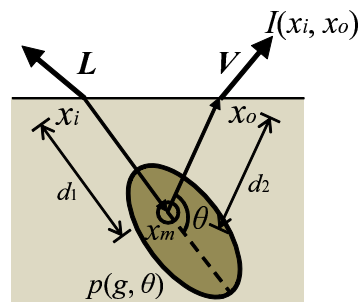


図2 一様な媒体内での単一散乱のモデル

した牛乳などの散乱媒体の空間的分布を推定する手法も提案されている [20] [21]。本研究は [18] と同様にプロジェクタを用いて単一散乱成分のみを抽出し、さらに [21] と同様に単一散乱モデルに当てはめることで、カメラから見た半透明物体表面の高さを推定するものである。

相互反射を考慮した形状推定: 物体表面上のある面の反射光が別の面を照らす相互反射もまた、形状推定を困難にする要因の一つである。相互反射が存在するシーンでの形状推定のアプローチは大きく分けて、(1) 大域照明を取り除く、(2) 大域照明もモデル化する、(3) 大域照明そのものを手がかりとする、の3通りが考えられる。(1)として、Nayar ら [22] は高周波照明によって相互反射を取り除いて照度差ステレオ法を用いた。(2)として、同じく Nayar ら [23] はラジオシティに基づいて相互反射成分をモデル化し、反復的に形状を推定した。(3)として、最近、Liu ら [24] は相互反射のライトトランスポートに形状復元の手がかりが含まれていることを示している。

相互反射は、大域照明という意味で散乱光と性質が似ており、同様のアプローチは散乱光が存在するシーンでの形状推定にも当てはまる。散乱光の場合には、前述の通り (1) や (2) のアプローチは存在する。一方、本研究は (3) の散乱光そのものを形状推定の手がかりにしようという新しい試みである。

3. 単一散乱による深度推定の原理

3.1 単一散乱のモデル

単一散乱とは図2に示すように、物体表面上のある点 x_i に入射した光が媒体中の x_m で一度だけ微粒子と衝突し、物体表面 x_o から出射する散乱現象を指す。入射方向のベクトル L 、出射方向のベクトル V 、及び物体の屈折率が既知である場合、物体内での光路は一意に定まる。 x_i に入射した光が x_m で微粒子に衝突するまでの距離を d_1 、衝突点 x_m から出射する点 x_o までの距離を d_2 とすると、光は光路長 $d_1 + d_2$ に対して指数関数的に減衰する [25] ことから、式 (1) のようにモデル化される。

$$I(x_i, x_o) = sp(g, \theta) e^{-\sigma_t(d_1+d_2)} \quad (1)$$

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

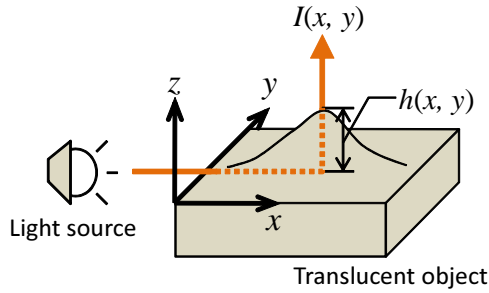


図3 深度推定のセッティング

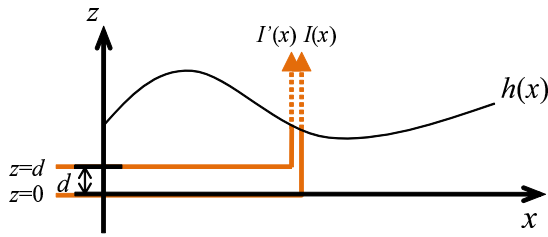


図4 1次元での深度推定

ここで、 s は入射光の強さを表すスケーリング定数、 σ_t は光の減衰の強さを示す消滅係数、 $p(g, \theta)$ 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。フェーズ関数は式 (2) で表され、散乱の等方性を決めるパラメータ g により特徴づけられる。 g は前方散乱では正の値、等方散乱ではゼロ、後方散乱では負の値を取る。

3.2 深度推定の定式化

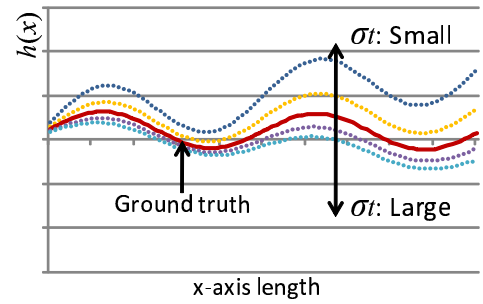
本研究では図3に示すように、光学的に一樣な媒体に入射した光が垂直方向に出射する単一散乱に着目する。物体に対する照明と観測系は共に平行光を仮定し、屈折の影響は無視する。物体表面上のある点 (x, y) で観測される輝度値 $I(x, y)$ からその点の深度 $h(x, y)$ を求めることを考える。ここで求める深度は y 方向について独立して求められるため、一般性を失うことなく入射点から x 離れた点での深度 $h(x)$ を推定する1次元の問題として定式化できる。図4に示すように $z = 0$ の高さで照明し、垂直方向で観測される単一散乱の輝度値を $I(x)$ とするとき、単一散乱の強度は式 (3) のように表される。

$$I(x) = S e^{-\sigma_t(x+h(x))} \quad (3)$$

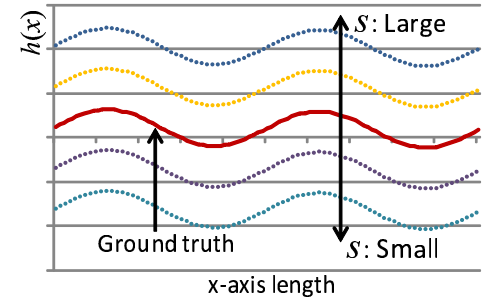
$$S = sp(g, \theta) \quad (4)$$

ここで、平行光を仮定しているため、単一散乱の反射角 θ は全ての位置において $\pi/2$ となる。また、光学的に一樣な材質を仮定しているため、フェーズ関数 $p(g, \theta)$ を定数としてスケーリング定数に組み込み、 S に置き換えている。式 (3) の両辺の対数を取り、深度 $h(x)$ に関して式 (3) を整理することで式 (5) が得られる。

$$h(x) = \frac{1}{\sigma_t} \log S - x - \frac{1}{\sigma_t} \log I(x) \quad (5)$$



(a) 消滅係数 σ_t に関する曖昧性 (スケーリング定数 S は固定)



(b) スケーリング定数 S に関する曖昧性 (消滅係数 σ_t は固定)

図5 深度の曖昧性

入射位置からの距離 x における深度 $h(x)$ は σ_t, S を推定することで求められることがわかる。

3.3 深度の曖昧性

式 (5) は観測される明るさと深度の関係を表している。しかし、実際には消滅係数 σ_t とスケーリング定数 S は未知であり、深度の曖昧性が生じることになる。図5は各パラメータが深度に対して与える曖昧性の例を示している。消滅係数 σ_t は観測される輝度値 $I(x)$ に反比例するパラメータであり、推定結果に直接影響を及ぼし、求められる形状自体に曖昧性を与える。特に、 σ_t が小さいほど形状の起伏が増幅される。一方、スケーリング定数 S は位置 x に依存しないために深度 $h(x)$ に対してオフセットの役割を果たす。そのため、深度の相対的な位置のみが変化し、値の大小に関わらず形状に対する曖昧性は与えない。以上より、物体の形状を求めるためには、消滅係数 σ_t による曖昧性を解消する必要がある。

3.4 深度の曖昧性の解消

消滅係数 σ_t の曖昧性は式 (5) だけでは解消できない。そこで照明の高さを $z = 0$ として得られる単一散乱 $I(x)$ に加え、図4のように $z = d$ と変化させた場合の単一散乱 $I'(x)$ を考える。

$$I'(x) = S e^{-\sigma_t(x+h(x)-d)} \quad (6)$$

この二組を σ_t について整理すると、式 (7) のようになる。

$$\sigma_t = \frac{I'(x) - I(x)}{d} \quad (7)$$

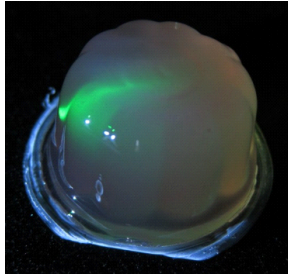


図 6 半透明物体中での散乱の様子

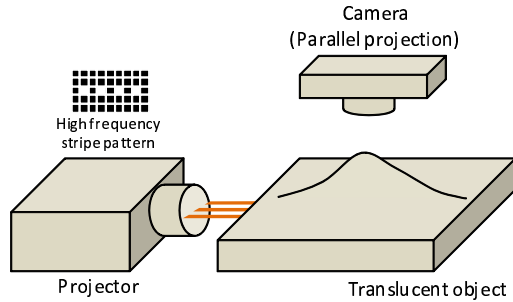


図 7 プロジェクタとカメラの設置

d の値は既知であるため、 σ_t を一意に求めることができる．ここで求めた消滅係数 σ_t を式 (5) に代入することで、物体の形状が得られる．

4. 現実問題への適用

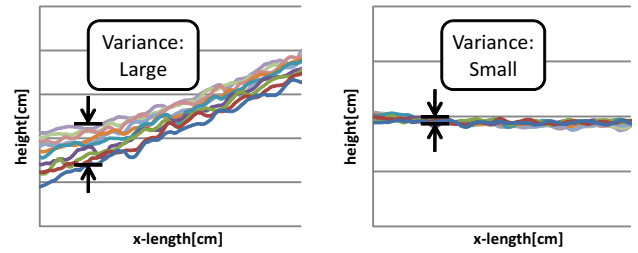
4.1 単一散乱の抽出

現実の半透明物体において観測される散乱には単一散乱以外の成分も含まれている．例として、半透明物体であるゼリーに対してレーザー光を照射した場合の散乱の様子を図 6 に示す．この結果から、直進性の高いレーザー光が広がって観測される様子が確認できる．これは光が物体中の微粒子に複数回衝突することで生じる多重散乱によるものである．このように、物体内における散乱は 1 回だけ散乱を起こす単一散乱のみではなく、複数回散乱を起こす多重散乱も含んでいる．そのため、単一散乱の成分のみを抽出する必要がある．

Mukaigawa ら [18] はプロジェクタからストライプ状の高周波パターンを投影することで、単一散乱と多重散乱を分離できることを示した．本研究でも同様にプロジェクタを光源として用いることで単一散乱成分のみを抽出する．計測のためのセッティングは図 7 に示すものであり、光源の入射方向と垂直な方向に設置したカメラにより単一散乱を観測する．カメラのキャリブレーションにより、半透明物体に対する照明の入射位置から単一散乱が反射する位置 x は既知となる．そのため、式 (5) に観測した輝度値を当てはめることで、深度 $h(x)$ を求めることができる．

4.2 深度推定精度の向上

3.4 節では入射位置を 2 段階に変えることで曖昧性が



(a) 誤った消滅係数の場合 (b) 正しい消滅係数の場合

図 8 消滅係数と求められる深度の分散との関係

解消され、深度が求められるという数値計算上の原理を説明した．しかし、実際に撮影される画像にはノイズが含まれ、2 組の単一散乱の輝度値のみで推定される消滅係数 σ_t には大きな誤差が含まれる可能性が高い．特に、観測される単一散乱成分が小さい場合、ノイズの影響を大きく受けることとなる．

本研究ではノイズによる σ_t の推定誤差の影響を抑えるため、照明の高さを変えたより多くの画像を用いることを考える．照明の高さを基準面から d_i だけ変化した位置から照明すると、得られる単一散乱の成分は次式のように表される．

$$I_i(x) = S e^{-\sigma_t(x+h(x)-d_i)} \quad (8)$$

ここで、観測した単一散乱 $I_i(x)$ と任意の消滅係数 σ_t より得られる深度 $h_i(x, \sigma_t)$ を考える．

$$h_i(x, \sigma_t) = \frac{1}{\sigma_t} \log S - x - \frac{1}{\sigma_t} \log I_i(x) + d_i \quad (9)$$

正しい消滅係数が与えられれば、照明の高さ $z = d_i$ が変化しても求められる $h(x)$ は変化しない．しかし、誤った消滅係数 σ_t を用いた場合、各 d_i で求められる深度は変化する．図 8 は誤った消滅係数を用いることで実際に推定される深度がどのように変動するかの例を示している．誤った消滅係数を使用した場合、図 8(a) のように分散は大きくなるが、正しい消滅係数を使用すれば、図 8(b) のように分散は小さくなる．そのため、推定された $h_i(x, \sigma_t)$ の分散を調べることで正しい消滅係数を推定することが可能となる．

一方で、単一散乱の輝度値が十分でなくノイズの影響が大きくなる場合は、消滅係数の推定に悪影響を与えるおそれがある．ノイズレベルが一定であると仮定すれば、輝度値と S/N 比は比例関係となる．そこで、式 (11) のように輝度値に基づいた重み w_i を設定し、式 (10) のように重みを考慮した分散が最小となるように消滅係数を求める．また、深度の平均値 $\overline{h(x, \sigma_t)}$ は各深度 $h_i(x, \sigma_t)$ に対して式 (11) の重みづけをした加重平均とする．

$$\sigma_t = \arg \min_{\sigma_t} \sum_{i=1}^n w_i \sum_{x=0}^{X_{max}} (h_i(x, \sigma_t) - \overline{h(x, \sigma_t)})^2 \quad (10)$$

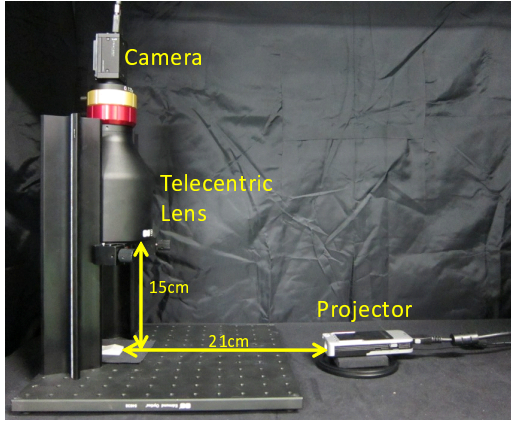


図9 実験環境

$$w_i = \frac{\sum_{x=0}^{X_{max}} I_i(x)}{\sum_{k=1}^n \sum_{x=0}^{X_{max}} I_k(x)} \quad (11)$$

$$\overline{h(x, \sigma_t)} = \sum_{i=1}^n w_i h_i(x, \sigma_t) \quad (12)$$

ここで、 X_{max} は計測範囲となる入射面からの最大距離である．このように複数の画像を利用することで、ノイズの影響を抑えながら消滅係数を求めることができる．最終的な深度は式 (12) により求まる．

5. 実験結果

5.1 実験環境

本実験では図9に示す実験環境で、単一散乱を用いた形状計測を行った．計測物体に対してプロジェクタ (3M MPro110) を物体の側面から投影できる位置に設置し、光源の入射方向に対して垂直な方向から撮影できるようにカメラ (Point Grey Grasshopper) を上方に設置した．なお、カメラにはテレセントリックレンズ (Edmund Optics) を使用し、平行射影を仮定できる環境にしている．プロジェクタは完全な平行射影ではないが、物体に照射するのは投影範囲のごく一部であり、物体に対する入射深度を 0.3mm 間隔で 10 段階変化させても、入射角度の変化の最大値は 1 度未満であるため、無視できる範囲である．

5.2 深度推定精度の検証

まず、単一散乱が形状推定の手掛かりとして有効であることを確かめるために、形状が既知である物体を用いて実験を行った．計測対象として、図1で用いた平面・谷・山を組み合わせた形状を持つ白濁したプラスチックを使用した．これは図1(a)に示すように強い単一散乱を観測できる物体である．それぞれの厳密な形状を図10に示す．

本実験では光の入射方向に対してのみ深度が変化する配置で、計測物体の側面に対してプロジェクタによる投影を行った．そのため、入射位置からの距離 x にお

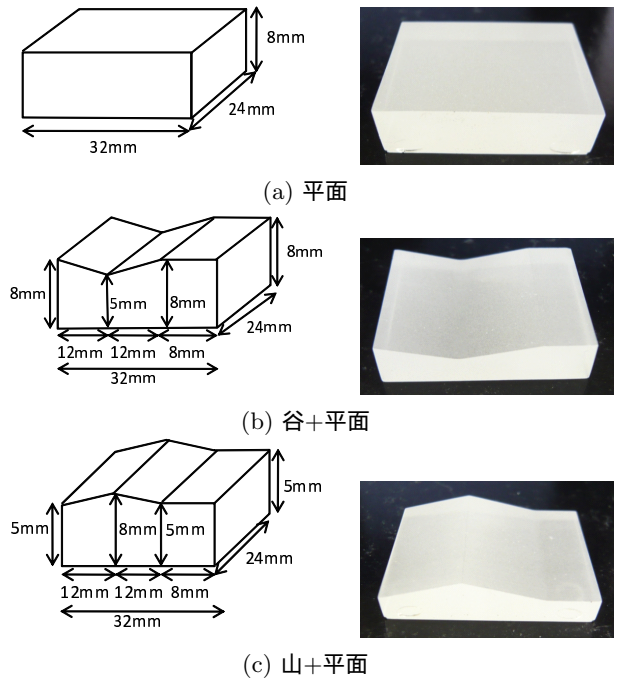
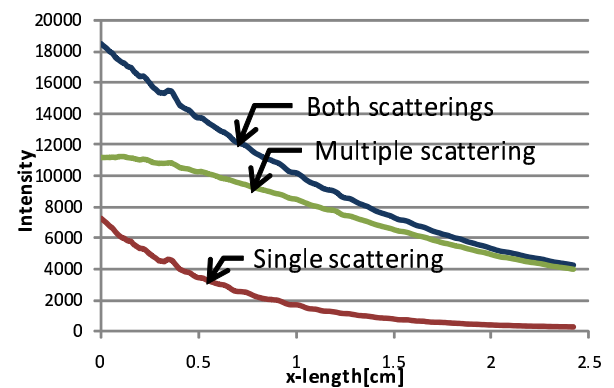
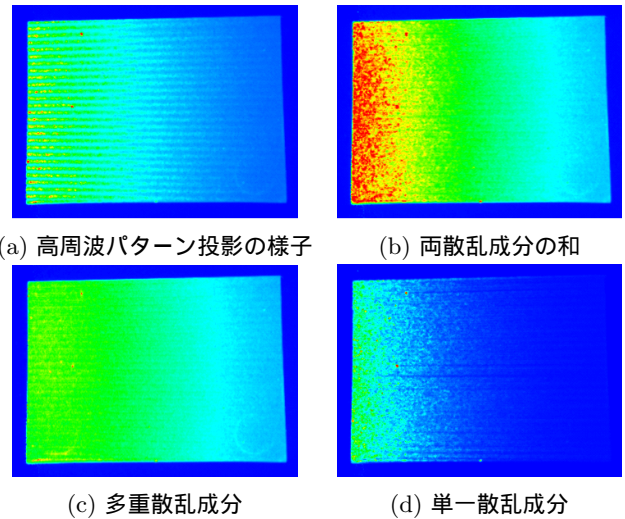
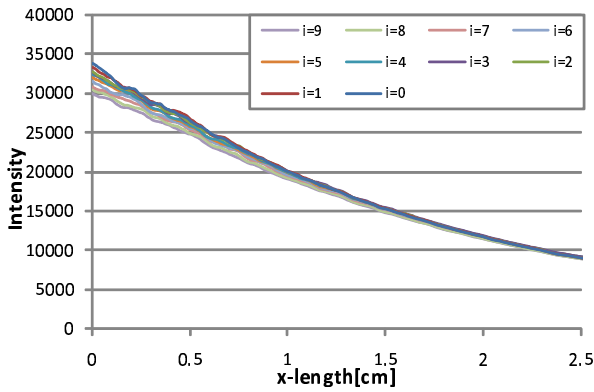


図10 計測対象物体

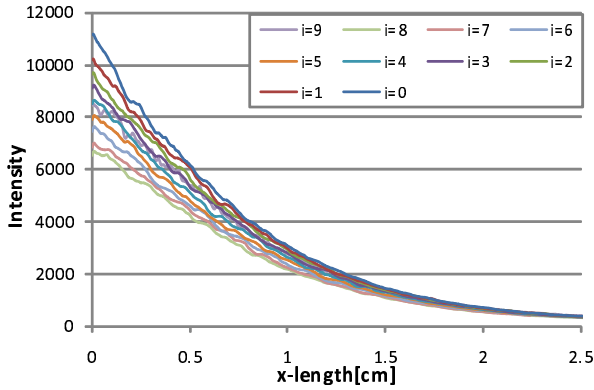


(e) 散乱成分の輝度値の変化
図11 平面における各散乱成分

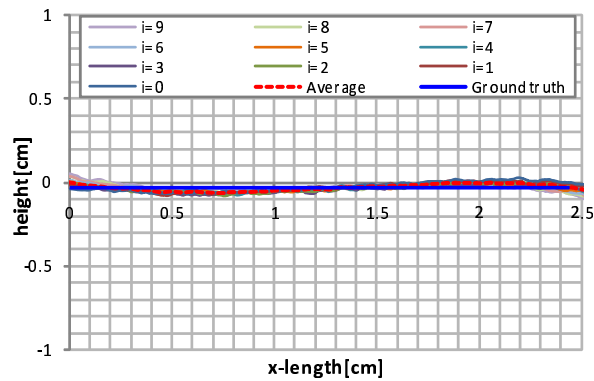
ける深度 $h(x)$ を評価する．投影パターンに入射深度は 0.3mm 間隔で 10 段階変化させた．カメラの F 値は 6 に固定し、露光時間はキャプチャされる画像の明るさから



(a) 抽出前の輝度値



(b) 抽出した単一散乱

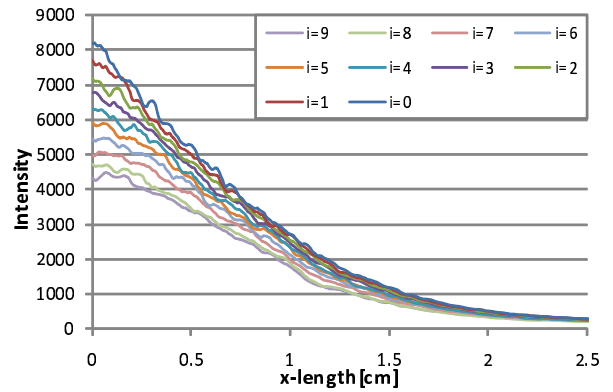


(c) 深度推定結果

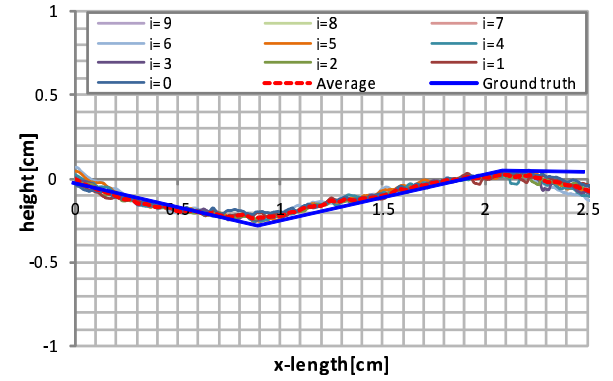
図 12 平面の計測結果

撮影対象毎に適宜設定を行っている。また、式 (5) におけるスケリング定数 S は $h(0) = 0$ となるように設定し、深度推定に使用する輝度値はノイズを軽減するために、深度の一定方向に対する平均値を使用している。

図 10(a) の物体に対して単一散乱と多重散乱を分離した結果を図 11 に示す。図 11(a) はプロジェクタから高周波パターンを投影した様子、(b) は両散乱成分の和、(c) は単一散乱成分、(d) は多重散乱成分であり、それぞれ疑似カラー画像で表している。ここで、単一散乱と多重散乱の分離は Mukaigawa ら [18] が示した手法によって行っており、実際にプロジェクタから投影した場合の輝度値のスケールと両成分の和の輝度値のスケールは異なっている。各散乱の輝度値の変化を図 11(e) に示す。両散乱



(a) 抽出した単一散乱

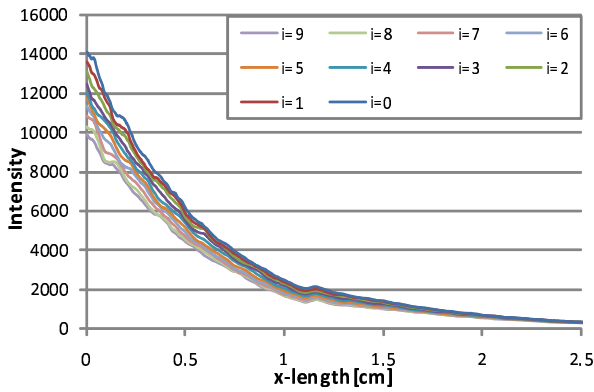


(b) 深度推定結果

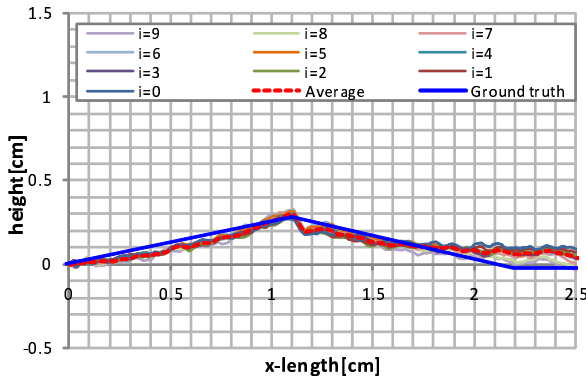
図 13 谷+平面の計測結果

成分の和は単一散乱と似たような形になっているが、多重散乱のバイアスがかかっており、指数関数的な減衰ではない。一方で、単一散乱は入射面からの距離が増えるごとに輝度値が 0 に近づいており、指数関数的な減衰の様子を見ることができる。

図 12 ~ 14 は、それぞれ図 10(a) ~ (c) の物体から抽出した単一散乱の輝度値、および形状推定を行った結果である。深度推定結果においては、照明の高さを変えた場合の各単一散乱から推定された深度と共に、赤の破線で最終的な推定結果を示している。なお、青の実線は真値である。各形状の推定結果において真値との差は $\pm 1\text{mm}$ ほどであり、ある程度の精度をもって推定出来ている。また、入射位置から遠くなり、単一散乱の輝度値が小さくなるほど、推定される深度の分散も大きくなりつつあることもわかり、4.2 節で提案した重み付けの必要性が確認できる。一方で、図 13(b) と図 14(b) に示す山や谷を持つ形状の推定結果において特に 2cm 以降の深度が真値と異なっている。これは、入射位置から遠くなるほど十分な強度の単一散乱を観測できなくなり、正しい単一散乱の輝度値が得られていないことが原因と考えられる。理想的な単一散乱は入射位置から離れるほど、指数関数的に減衰し、限りなく 0 に近づく。しかし、各単一散乱のグラフからもわかるように、得られる単一散乱にはわずかながらオフセットが存在している。単一散乱の抽出法には本研究で採用している高周波パターン投影法 [18]



(a) 抽出した単一散乱



(b) 深度推定結果

図 14 山+平面の計測結果

や偏光板を用いた手法が存在するが、これらの手法は厳密に単一散乱のみを抽出することはできない。抽出した単一散乱には低次の多重散乱も含まれ、それはオフセットとして単一散乱自身の強度が低い部分に現れる。これらの手法における抽出精度は今後の課題の一つとなっている。

本実験において、入射位置から離れた位置における推定誤差はやや大きくなったが、入射位置に近いところではほぼ正しく深度を推定できていることが確かめられた。

5.3 2次元的に形状変化する物体の深度推定

前節では1次元方向のみに深度が変化する物体を用いた。本節では、図15(a)のような2次元方向に深度が変化する花卉の形状を持つ物体の深度推定を行った結果について述べる。この実験においても図9に示す環境において、プロジェクタからの投影パターンの深度変化を10段階に設定し、計測を行った。図15(c)が疑似カラーで表した深度推定結果であり、青いほど深度が低いことを、赤いほど深度が高いことを示す。結果からわかるように、青い部分が花卉の凹部、赤が凸部に相当しており、大まかな凹凸は推定できていることがわかる。しかし、細部は不正確で絶対的なスケールも正しくないことから、完全な形状推定ができたとは言えない。

これは物体の表面における光の屈折の影響を考慮していないことが大きな原因である。本研究では物体内にお

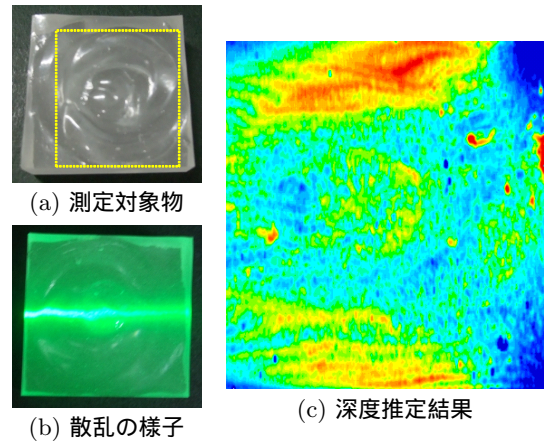


図 15 2次元的に形状変化する物体の深度推定

いて一度だけ散乱を起こし、入射光と垂直な方向に反射する単一散乱を観測することを仮定している。しかし、実際には出射面における屈折により、垂直に反射する光をそのまま観測することができない。特に、エッジ部においては屈折角が平面部と大きく変化するため、輝度値の変化は観測できるが、理想的な減衰として観測することができない。そのために、正しい深度を推定できなかったと考えられる。

5.4 制限

提案手法には以下に述べる制限事項がある。

屈折による影響: 本研究では屈折による影響を無視することで散乱方向は常に $\pi/2$ であると仮定し、フェーズ関数を定数とみなす定式化を行った。そのため、出射面での屈折による影響を避けることができず、実験においては厳密に正しい形状を推定することができなかった。図16は屈折が深度推定に及ぼす影響の一例である。山形の形状を測る場合の光路は図16(a)のようになる。ここで図16(c)のような前方散乱を仮定すると、屈折により散乱する光の強度は山の前半においては低く、後半においては高くなる。そのため、フェーズ関数を定数とみなすと図16(b)に示すように、前半においては高い深度、後半においては低い深度と誤った推定結果が得られてしまう。これは図14(b)に示す実験結果にも現れており、屈折の影響が形状推定に及ぶものであることがわかる。

入射面の形状: 問題設定において、計測物体の入射面はプロジェクタの入射光に対して垂直であると仮定している。一般的な2次元形状に対して適用するためには、この制限を取り払わなければならない。しかし、入射面の形状による屈折も考慮する必要があるため、単純に本研究での推定手法を利用することはできない。

強い多重散乱: 本研究では物体の内部における単一散乱に着目して深度推定を行う。そのため、多重散乱が強く単一散乱が物体の奥まで十分に観察できない場合には、完全な形状推定は困難となる。

計測対象物の材質: 本手法における定式化において、計

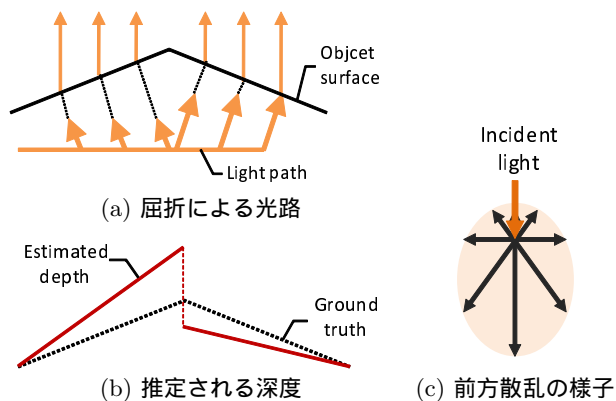


図 16 屈折による推定誤差

測対象物は光学的に様な材質であると仮定した。そのため、内部が不均一な物体への適用はできない。

6. おわりに

本研究では単一散乱を用いる新たな半透明物体の形状計測手法の提案を行った。これは単一散乱の減衰モデルを適用し、観測した輝度値から光路長を推定し、深度を求めるものであった。深度を推定するにあたり、材質が不明であると推定に曖昧性が生じてしまうが、照明の高さを変えて複数回計測することで、一意に推定が行えることを示した。実際に1次元的に形状が変化する物体及び、2次元的に変化する物体を用いて形状計測を行い、単一散乱が物体形状を推定するための手がかりとして利用できることを確かめた。

本研究では、物体の屈折を考慮していないため、厳密な形状を求めることは困難であることが明らかとなった。また、単一散乱をほとんど含まない半透明物体の形状を推定することも難しい。今後はそのような物体の計測にも対応できるように、撮影手法の工夫や単一散乱以外の散乱成分や反射成分の利用により推定精度の向上を目指す。

文 献

- [1] G.Godin, M.Rioux, J.A.Beraldin, "An assessment of laser range measurement on marble surfaces", Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 2001.
- [2] T.Chen, H.P.A.Lensch, C.Fuchs, H.P.Seidel, "Polarization and phase-shifting for 3d scanning of translucent objects", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007.
- [3] M.Goesele, H.P.A.Lensch, J.Lang, C.Fuchs, H.P.Seidel, "DISCO - Acquisition of Translucent Objects", SIGGRAPH2004, pp.835-844, 2004.
- [4] B.K.P.Horn, "Shape from shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view", MIT Project MAC Internal Report TR-79 and MIT AI Laboratory Technical Report 232, 1970.
- [5] R.J.Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", Optical Engineering, Vol.19, No.1, 1980.
- [6] G.Healey and T.O.Binford, "Local shape from specularly", Computer Vision, Graphics, and Image Pro-

- cessing, Vol.42, pp.62-86, 1987.
- [7] A.C.Sankaranarayanan, A.Veeraraghavan, O.Tuzel, A.Agrawal, "Specular surface reconstruction from sparse reflection correspondences", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010.
- [8] C.Zhou, O.Cossairt, S.Nayar, "Depth from diffusion", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010.
- [9] M.Liao, L.Wang, R.Yang, M.Gong, "Light fall-off stereo", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007.
- [10] D.Miyazaki and K.Ikeuchi, "Shape estimation of transparent objects by using inverse polarization ray-tracing," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.29, No.11, pp.2018-2030, 2007.
- [11] K.N.Kutulakos and E.Steger, "A theory of refractive and specular 3d shape by light-path triangulation", IEEE International Conference on Computer Vision, 2005.
- [12] B.Trifonov, D.Bradley, W.Heidrich, "Tomographic reconstruction of transparent objects", Eurographics Symposium on Rendering, 2006.
- [13] M.B.Hullin, M.Fuchs, I.Ihrke, H.P.Seidel, H.P.A.Lensch, "Fluorescent immersion range scanning", ACM Transaction on Graphics, Vol.27, Issue.3, 2008.
- [14] N.J.Morris and K.N.Kutulakos, "Reconstructing the surface of inhomogeneous transparent oscenes by scatter trace photography", IEEE International Conference on Computer Vision, 2007.
- [15] S.G.Narasimhan, S.K.Nayar, B.Sun, S.J.Koppal, "Structured light in scattering media", IEEE International Conference on Computer Vision, 2005.
- [16] J.Kim, D.Lanman, Y.Mukaigawa, R.Raskar, "Descattering transmission via angular filtering", European Conference on Computer Vision, 2010.
- [17] M.Pharr and P.Hanrahan, "Monte carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection" SIGGRAPH2000, pp.75-84, 2000.
- [18] Y.Mukaigawa, Y.Yagi, R.Raskar, "Analysis of Light Transport in Scattering Media", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010.
- [19] S.G.Narasimhan, M.Gupta, C.Donner, R.Ramamoorthi, S.K.Nayar, H.W.Jensen, "Acquiring scattering properties of participating media by dilution", SIGGRAPH2006, pp.1003-1012, 2006.
- [20] T.Hawkins, P.Einarsson, P.Debevec, "Acquisition of time-varying participating media", ACM Transactions on Graphics, Vol.24, Issue.3, 2005.
- [21] J.Gu, S.K.Nayar, E.Grinspun, "Compressive structured light for recovering inhomogeneous participating media", European Conference on Computer Vision, 2008.
- [22] 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", SIGGRAPH2006, pp.935-944, 2006.
- [23] S.K.Nayar, K.Ikeuchi, T.Kanade, "Shape from inter-reflections", International Journal of Computer Vision, pp.173-195, 1991.
- [24] S.Liu, T.T.Ng, Y.Matsushita, "Shape from second-bounce of light transport", European Conference on Computer Vision, 2010.
- [25] J. Stam, "Multiple scattering as a diffusion process", Proc. Eurographics Rendering Workshop, 1995.