論 文

単一散乱の減衰に基づく半透明物体の形状推定

井下 智加^{†a)} 向川 康博[†] 松下 康之^{††} 八木 康史[†]

Shape Estimation of Translucent Objects Based on Attenuation of Single Scattering

Chika INOSHITA^{†a)}, Yasuhiro MUKAIGAWA[†], Yasuyuki MATSUSHITA^{††}, and Yasushi YAGI[†]

あらまし 半透明物体は入射光を散乱させる性質をもつ.そのため,反射光や透過光を用いる既存の手法によ り半透明物体の形状を計測することは困難である.そこで本研究では単一散乱の減衰に基づいて半透明物体の形 状を推定するための新たな手法を提案する.単一散乱は入射光が物体中で一度だけ粒子と衝突することで起こり, 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.更に,物体の散乱特性と推定形状には曖昧性が存在するが,照明の入 射位置をずらしながら撮影した複数の輝度値を用いることで曖昧性を解消できることを示す.実験により,単一 散乱が形状計測の手掛りとして利用できることを確認した.

キーワード 単一散乱, 散乱解析, 半透明物体, 形状推定

1. まえがき

自濁したプラスチックなどの半透明な物体では,表 面に入射した光が内部で散乱する.三次元形状の計測 技術は既に成熟しているようにも見られるが,いまだ 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るため,計測誤差が生じること を示している.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形状計測法の利用は難し くなり,商用レーザレンジファインダでも計測できな くなる.図1に強い散乱が生じる半透明物体の形状を

a) E-mail: inoshita@am.sanken.osaka-u.ac.jp



(a) 計測対象物の散乱の様子 (c) レーザレンジファインタ
 による計測結果

図 1 半透明物体の形状計測の失敗例 Fig. 1 Failed shape measurement of translucent objects.

レーザレンジファインダで計測した例を示す.手の形 状は計測できているが、半透明物体の形状はうまく計 測できていないことが分かる.

散乱,吸収の特性は波長依存であるため,赤外や紫 外の波長帯域で観測すれば,散乱の広がりも変化する. 可視光において強い散乱が生じていたものが,可視光 の少し外側の波長で急に不透明になるような特殊な ケースを除けば,一般に散乱の性質が大きく変化する

[†] 大阪大学産業科学研究所, 茨木市 The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki-shi, 567-0047 Japan ^{††} マイクロソフトリサーチアジア, 中国

Tower 2, No.5, Danling Street, Haidian District, Beijing, P.R. China, 100080

ことはないため、やはり散乱の解析は重要である.もしも、透過性の高い X 線まで波長を変えることが可能な計測環境であれば、X 線の吸収率の高い物体は散乱の影響を受けず、CT による形状計測が可能である.しかし、プラスチックは一般に軽元素で構成されているため X 線吸収率が低く、明瞭なコントラストの撮影結果が得られないことから形状推定は困難である [2].

これまで,三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[3]は比較的散乱光に強いとされる位相シ フト法に偏光板を組み合わせて散乱光の影響を抑えた. また,Goeseleら[4]は半透明物体のモデリングをし ているが,形状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去した.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,我々は,全く逆に散乱光そのものを 手掛りとした新しい形状計測法を提案している[5].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計測手法は,原理そ のものが新しく,光源の波長を変化させても散乱現象 が消えない物体の場合でも適用することができる.

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.これまで に,拡散反射 [6], [7],鏡面反射 [8], [9] など,様々な光 学現象が手掛りとして利用されてきた.

最近では、Zhou ら [10] 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 [11] は光のエネルギーが距離 の2乗に反比例して減衰することを利用して物体形状 を推定している.このように、明るさ解析に基づいた 様々な手法が提案されているが、散乱光を手掛りとし た形状推定法は見当たらない.

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、この透過光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 [12] 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 [13] は 透過光の光路追跡に必要な視点・参照点・屈折回数の 関係から形状を推定した. Trifonovら[14]は計測物 体を同じ屈折率をもつ液体中に沈め、トモグラフィー による推定手法を適用した.また,Hullinら[15]は 蛍光の性質をも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 [16] 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[17]は単一散乱を考慮し た構造化光投影法,及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[18]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,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 [19] 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.しかし,近 年, Mukaigawa ら [20] は光源としてプロジェクタを 用いて、単一散乱成分のみを抽出する手法を提案し た. また, Narasimhan ら [21] 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た.このように、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 [22], [23]. 本研究は [20] 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,更 に[23] と同様に単一散乱モデルを当てはめることで、 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)相互反射を取り除く,(2)相互反射もモデル化す る,(3)相互反射そのものを手掛りとする,の3通り が考えられる.(1)として,Nayarら[24]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[25]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,Liuら[26]は相互反射 のライトトランスポートに形状復元の手掛りが含まれ ていることを示している.

散乱光は、大域照明という意味で相互反射と性質が 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、 前述のとおり(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掛 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、出射方向、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 [27] ことから、式 (1) のようにモデル化される.

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

$$\tag{1}$$

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

ここで, s は入射光の強さを表すスケーリング定数,



図 2 一様な媒体内での単一散乱のモデル

Fig. 2 Model of single scattering in homogeneous media.

 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 $g(-1 \le g \le 1)$ により特徴 づけられる.

3.2 深度推定の定式化

本研究では図3に示すように、光学的に一様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.ここで、物体に対する照明と観測系は共に平行光であり、入射面は平面とし、屈折の影響は無視できると仮定する.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,y)を推定する問題として定式化できる.図4に示すようにz = 0の高さに照明し、垂直方向で観測される単一散乱の輝度値をI(x,y)とするとき、単一散乱の強度は式(3)のように表される.

$$I(x,y) = Se^{-\sigma_t(x+h(x,y))}$$
(3)

$$S = sp(g, \theta) \tag{4}$$

ここで、平行光を仮定しているため、単一散乱の反射 角 θ は常に $\pi/2$ となる.また、一様な材質を仮定して 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) の両辺の対数をとり、深度h(x, y)に関して整理する



Fig. 4 One-dimensional shape estimation.

ことで次式が得られる.

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

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

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,y) の対数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,y) 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,値の大小にかか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 乱強度 I(x, y) に加え,図 4 のように z = d と変化さ せた場合の単一散乱強度 I'(x, y) を考える.



(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 Fig. 5 Ambiguity of estimated shape.

$$I'(x,y) = Se^{-\sigma_t(x+h(x,y)-d)}$$
(6)

この二組を σ_t について整理すると、次式のようになる.

$$\sigma_t = \frac{\log I'(x,y) - \log I(x,y)}{d} \tag{7}$$

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.図6に半透明の性質 をもつゼリーにレーザ光を照射した場合の散乱の例を 示す.この結果から,直進性の高いレーザ光が広がっ 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 [20] 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3の 光源をプロジェクタに置き換えたものとなる.

4.2 深度推定精度の向上

3.4 では入射位置を2段階に変えることで曖昧性が 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弱い場合、ノイ ズの影響を大きく受けることとなる.



図 6 半透明物体中での散乱の様子 Fig. 6 Scattering in translucent object.

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 z = 0 から d_i だけ変化させ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.

$$I_i(x,y) = Se^{-\sigma_t(x+h(x,y)-d_i)}$$

$$\tag{8}$$

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

$$h_i(x, y, \sigma_t) = \frac{1}{\sigma_t} (\log S - \log I_i(x, y)) - x + d_i$$
 (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深度は変化しない.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 深度は変化してしまう.図7は異なる消滅係数を用い ることで,照明の高さ $z = d_i$ における単一散乱から 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.誤った消滅係数では,照明の高さ d_i が異なる単 一散乱から推定される深度の分散は (a)のように大き くなるが,正しい消滅係数の場合では,推定される深 度の分散は (b)のように小さくなる.そのため,推定 された $h_i(x, y, \sigma_i)$ 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小さくノイズの影響が 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、SN比は輝度値に比例する.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 $\overline{h(x, y, \sigma_t)}$ は各深度



- 図 7 消滅係数と推定される深度の関係. なお各系列は異 なる照明の高さ d_i において観測した単一散乱から 推定した深度である.
- Fig. 7 Relation between attenuation coefficient and variance of estimated height. Each line indicates the estimated height from single scattering of different illumination height d_i .

 $h_i(x, y, \sigma_t)$ に対して式 (11) の重み付けをした加重平 均とする.

$$\sigma_{t} = \arg_{\sigma_{t}} \sum_{i=1}^{n} w_{i} \sum_{x=0}^{X_{max}} (h_{i}(x, y, \sigma_{t}) - \overline{h(x, y, \sigma_{t})})^{2} (10)$$
$$w_{i} = \frac{\sum_{x=0}^{X_{max}} I_{i}(x, y)}{\sum_{k=1}^{n} \sum_{x=0}^{X_{max}} I_{k}(x, y)}$$
(11)

$$\overline{h(x, y, \sigma_t)} = \sum_{i=1}^n w_i h_i(x, y, \sigma_t)$$
(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.このように多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 8 に示すように,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, カメラ (Point Grey Grasshopper) を光源の入射方向 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 体に対する入射深度を 0.3 mm 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,平行とみなせる.

5.2 深度推定精度の検証

まず計測対象として図1(b)で示した強い散乱が生 じる白濁したプラスチックを素材とする平面・谷・山



図 8 実験環境 Fig.8 Experimental setting.



区 9 司 例外 家初译 Fig. 9 Translucent objects for experiment.

を組み合わせた物体を用い,その形状を推定する実験 を行った.それぞれの厳密な形状を図9に示す.この 物体はx軸方向にのみ高さが変化するため,入射位置 からの距離xに対する深度を評価する.投影パターン の入射深度は0.3 mm 間隔で10 段階変化させた.カ メラのF値は6に固定し,露光時間は撮影される画像 の明るさから撮影対象ごとに適宜設定を行った.また, 式(5)におけるスケーリング定数Sはx = 0におい て深度が0となるように設定した.

図 9(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 10 に示す.図 10(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,それぞれ擬似カラー画像で表している.各散乱の 輝度値の変化を図 10(e) に示す.両散乱成分の和は単 調減少しているが,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 11~図 13 は、それぞれ図 9(a)~(c) の物体から 抽出した単一散乱の輝度値、及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ともに、 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



Fig. 10 $\,$ Each scattering component in flat object.

との差は±1mm ほどであり,実際の高さが5~8mm であることを考えると決して小さな値とはいえないが, 概形は推定できていることが分かる.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分 かり,4.2で提案した重み付けの必要性が確認できる. 一方で,図12(b)と図13(b)に示す山や谷をもつ形 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.また,高周波照明による単一散乱の抽出[20]も完 全ではなく,多重散乱成分が残っていることも原因の 一つと考えられる.

5.3 二次元的に形状変化する物体の深度推定

前節では一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 14(a)のような二次元方向に深度が変化する花弁の形状をもつ物体の深度推定を行った結果について述べる.図 14(c)は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

i=8

i=4

•i=0

1.5

1,5

x-length[cm]

i=5 i=2

Aver:

x-length[cm]

(b) 深度推定結果図 13 山+平面の計測結果

Fig. 13 Estimated results of convex shape.

(a) 抽出した単一散乱

i=7

i=3

2

1=7

i=4

Ż

i=1 Ground truth

i=6

i=2

2,5

2.5

-i=9

i=5

i=1





(b) 散乱の様子

16000

12000

1000 to 100 to

0.5

-0.5

height[cm]

0

0

0.5

i=6

=3 =0

0,5



いほど深度が高いことを示す.この結果より,青い部 分が花弁の凹部,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分かる.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いがたい.

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ために, 正しい深度を推定できなかったと考えられる.

6. 屈折を考慮した推定形状改善

6.1 屈折の推定形状に与える影響

これまで、屈折による影響を無視していたため、出 射面での屈折による影響を避けることができず、5.の 実験では厳密に正しい形状を推定することができな かった.図15は屈折が深度推定に及ぼす影響の一例 である.山形の形状内部の実際の光路は(a)のように なる.ここで(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(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13(b)の実験結果にも現れ ており、屈折の影響が形状推定に及ぶものであること が分かる.

6.2 推定形状の改善

液体の表面形状の推定において、光線の屈折を手掛り とする形状復元手法は数多く提案されている [28], [29]. これらの研究では、物体表面における屈折により、物 体を通じて背景がひずんで観察されることを利用し、 推定される光路から形状を求めている.一方、本研究 で着目するのは単一散乱の光路と減衰量であり、背景 などの手掛りは利用しない.屈折を考慮した正しい光 路は形状から得られるが、形状推定の問題ではそもそ も形状自体が未知であるため、前もって光路を推定す ることはできない.そこで、仮の形状を出発点とし、 形状と光路を反復して推定することで形状の改善を目 指す.この問題においては、形状の更新の限定して話 を進めるため、屈折率 η 、フェーズ関数 $p(g, \theta)$ は既知 とする.また、消滅係数 σ_t も 4.2 の手法によりあら



かじめ推定したものを用いる.ただし,本節における 形状改善から得られた高さに対し,4.2の評価式を適 用することにより,消滅係数を更新することも可能で ある.

図 16 に示すように,処理は以下の4段階に分けられる.

(1) 初期形状の推定

はじめに初期形状の推定を行う.正しい光路は未知 であるため,初期形状は表面での屈折の影響を考慮し ていない 4.2 に示した推定手法に基づき求める.

$$\mathbf{p} = (x, y, h(x, y, \sigma_t))^T \tag{13}$$

ここで p は各点における深度を示す位置ベクトルで ある.

(2) 法線マップの作成

前ステップで得られた推定形状から各 (x, y) における法線 \mathbf{n} を求める.

$$\mathbf{n} = \left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial y}\right) / \left|\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial y}\right|$$
(14)

(3) 推定光路の更新

法線に基づいて、単一散乱の散乱位置から物体表面 までの光路を表す散乱ベクトル \mathbf{r} を求める.物体表面 における入射光と出射光の向きはスネルの法則により 関係づけられる.そのため、散乱ベクトル \mathbf{r} ,法線ベ クトル \mathbf{n} 及び出射ベクトル $\mathbf{i}_{\mathbf{z}}$ の関係は式 (15)のよう に定式化される.



Fig. 16 Flow of shape improvement taking refraction into account.



図 17 形状改善のコンセプト.初期形状における光路長 (橙色,破線)と更新後の光路長(水色,実線)は 同じ長さである. Fig. 17 Concept of shape improvement.

$$\mathbf{n} \times \mathbf{i_z} = \eta \mathbf{n} \times \mathbf{r} \tag{15}$$

この式を満たし,かつ長さが1となる散乱ベクトル**r** を求め,推定光路を更新する.

(4) 形状の更新

求めた散乱ベクトル \mathbf{r} から改善後の単一散乱の散乱 位置 (x', y') が推定される.これより,物体への光の 入射面から散乱位置 (x', y'),そして改善後の物体の 高さ h'(x, y) までの光路が求められる.光路長は単一 散乱の輝度値から特定されるため,光路に対して光路 長を当てはめることで改善後の形状を求めることがで きる.

以上のステップ(2)から(4)の処理を改善形状が 収束するまで繰り返す.

6.3 シミュレーションによる形状改善の検証

屈折を考慮した形状改善の有効性を確認するために シミュレーション実験を行った.図 15 で例示した山形 の形状で生じる単一散乱成分を合成して利用した.な お,屈折率 $\eta = 2$,消滅係数 $\sigma_t = 1$,散乱パラメータ g = 0,及びスケーリング定数s = 10000に設定した.

図 18 (a) は実際に用いた深度データ,式(5) に基 づいて求めた初期形状,及び反復回数ごとの形状を プロットしたものであり,それぞれ青の破線,赤の実 線,緑色の実線で表されている.初期形状は 6.1 に 示したように真値からずれているが,最終的に求めら れた形状は真値とほぼ同じ形状となっており,改善手 法が有効であることが分かる.しかし,不連続に形状 が変化する山の頂点においては厳密な法線が求めら れないため振動が見られる.このスパイク状の誤差は 反復回数が増すたびに小さくなっているが,反復回数 t = 5 では誤差が頂点の周囲に伝搬してしまっている. 図 18 (b) は反復回数ごとの平均絶対誤差及び最大絶対 誤差を示している.平均絶対誤差は初期形状から回数



Fig. 19 Refined result in real data.

を経るごとに小さくなっているが、反復回数t = 3 e境に逆に誤差が大きくなっている。最大絶対誤差はス パイク状の誤差のため、スパイク誤差をもたない初期 形状の方が小さい値となっているが、反復回数t = 1からt = 4 にかけては反復ごとに誤差が小さくなって いることが分かる。これは、スパイク状の形状から誤 差が周辺に伝搬してしまうためであり、正しい形状を 得るためには、誤差が最小になる反復回数で計算を打 ち切る必要がある。

6.4 実データによる形状改善の検証

屈折を考慮した形状改善の有効性を確認するため, 実データによる実験も行った.対象物体は **5.2** におい て使用した山+平面の形状であり,この実験で計測し た輝度値から形状を求める.計算に使用するパラメー タとして,屈折率 $\eta = 1.2$ (一般樹脂の平均屈折率), 消滅係数 $\sigma_t = 1.65$,散乱パラメータg = 0.1,及び スケーリング定数s = 10000に設定した.図 19 は 実際に提案改善手法により求めた反復ごとの形状であ る.赤は初期形状,緑色は反復ごとの形状を表す.初 期形状に対し,山の前半部分における改善形状は低く 修正されており,図 15(b)に示す真値に近づいている ことが確認できる.しかし,山の頂点部分においては, 反復ごとに誤差が周辺に伝搬しており,前節のシミュ レーションと同様の結果になっている.この現象への 対応は今後の課題である.

7.制 限

提案手法には以下に述べる制限事項がある.

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.一般的な二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性があるため, 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, 計測対象物は光学的に一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.

屈折を考慮した推定形状の改善:法線と深度を反復 的に推定することで,屈折を考慮して推定形状を改善 した.しかし,この反復処理により,形状が真値に収 束するかどうかは検証していない.また,形状が不連 続な点では法線が定義できないため,推定結果が不安 定となる問題が残っている.

8. む す び

本研究では単一散乱に基づく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る.深度を推定する際に材質が 不明であると推定結果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.実際に一次元的に形状が変化 する物体及び,二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 掛りとして利用できることを確かめた.また,屈折を 考慮した推定形状改善手法も提案し,シミュレーショ ンによりその有効性も確かめた.

本研究においては単一散乱のみを用いた形状推定を

行っているため,多重散乱が強く生じる光学的に濃い 半透明物体の形状を推定することが難しい.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の利用により推定精 度の向上を目指す.

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

- G. Godin, M. Rioux, and J.A. Beraldin, "An assessment of laser range measurement on marble surfaces," Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 2001.
- [2] 滝 克彦,高塩 創, C. Yong-Sung,塩田忠弘,開本 亮, 速水弘樹,中野 亮,"X線 CT による樹脂成形品中のガ ラス繊維の観察と三次元解析,"放射線による非破壊評価 シンポジウム講演論文集,2008.
- [3] T. Chen, H.P.A. Lensch, C. Fuchs, and H.P. Seidel, "Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects," IEEE CVPR, 2007.
- [4] 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.
- [5] 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,2011.
- [6] 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.
- [7] R.J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," Opt. Eng., vol.19, no.1, 1980.
- [8] G. Healey and T.O. Binford, "Local shape from specularity," Comput. Vis. Graph. Image Process., vol.42, pp.62–86, 1987.
- [9] A.C. Sankaranarayanan, A. Veeraraghavan, O. Tuzel, and A. Agrawal, "Specular surface reconstruction from sparse reflection correspondences," IEEE CVPR, 2010.
- [10] C. Zhou, O. Cossairt, and S. Nayar, "Depth from diffusion," IEEE CVPR, 2010.
- [11] M. Liao, L. Wang, R. Yang, and M. Gong, "Light fall-off stereo," IEEE CVPR, 2007.
- [12] D. Miyazaki and K. Ikeuchi, "Shape estimation of transparent objects by using inverse polarization raytracing," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.29, no.11, pp.2018–2030, 2007.
- [13] K.N. Kutulakos and E. Steger, "A theory of refractive and specular 3d shape by light-path triangulation," IEEE ICCV, 2005.
- [14] B. Trifonov, D. Bradley, and W. Heidrich, "Tomographic reconstruction of transparent objects," Eu-

rographics Symposium on Rendering, 2006.

- [15] M.B. Hullin, M. Fuchs, I. Ihrke, H.P. Seidel, and H.P.A. Lensch, "Fluorescent immersion range scanning," ACM Trans. Graph., vol.27, no.3, article no.87, 2008.
- [16] N.J. Morris and K.N. Kutulakos, "Reconstructing the surface of inhomogeneous transparent oscenes by scatter trace photography," IEEE ICCV, 2007.
- [17] S.G. Narasimhan, S.K. Nayar, B. Sun, and S.J. Koppal, "Structured light in scattering media," IEEE ICCV, 2005.
- [18] J. Kim, D. Lanman, Y. Mukaigawa, and R. Raskar, "Descattering transmission via angular filtering," ECCV, 2010.
- [19] M. Pharr and P. Hanrahan, "Monte carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection," SIGGRAPH2000, pp.75–84, 2000.
- [20] Y. Mukaigawa, Y. Yagi, and R. Raskar, "Analysis of light transport in scattering media," IEEE CVPR, 2010.
- [21] S.G. Narasimhan, M. Gupta, C. Donner, R. Ramamoorthi, S.K. Nayar, and H.W. Jensen, "Acquiring scattering properties of participating media by dilution," SIGGRAPH2006, pp.1003–1012, 2006.
- [22] T. Hawkins, P. Einarsson, and P. Debevec, "Acquisition of time-varying participating media," ACM Trans. Graph., vol.24, no.3, pp.812–815, 2005.
- [23] J. Gu, S.K. Nayar, and E. Grinspun, "Compressive structured light for recovering inhomogeneous participating media," ECCV, 2008.
- [24] 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.
- [25] S.K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Shape from interreflections," Int. J. Comput. Vis., pp.173–195, 1991.
- [26] S. Liu, T.T. Ng, and Y. Matsushita, "Shape from second-bounce of light transport," ECCV, 2010.
- [27] J. Stam, "Multiple scattering as a diffusion process," Proc. Eurographics Rendering Workshop, 1995.
- [28] H. Murase, "Surface shape reconstruction of a nonrigid transparent object using refraction and motion," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.14, no.10, pp.1045–1052, 1992.
- [29] Y. Ding, F. Li, Y. Ji, and J. Yu, "Dynamic fluid surface acquisition using a camera array," IEEE ICCV, 2011.

(平成 23 年 10 月 7 日受付, 24 年 2 月 19 日再受付)



井下 智加

2010 阪大・基礎工・情報科学卒.現在, 同大大学院情報科学研究科コンピュータサ イエンス専攻博士前期課程在籍中.



向川 康博 (正員)

1997 筑波大学大学院博士課程工学研究 科了.同年~2002 岡山大学助手.2003~ 2004年10月筑波大学講師.大阪大学助教 授を経て2007年4月より同大学准教授. コンピュータビジョンの研究に従事.博士 (工学).情報処理学会,日本バーチャルリ E を 会員

アリティ学会, IEEE 各会員.



松下 康之

1998 東大・工・電子情報卒. 2003 同大 大学院工学系研究科電子情報工学専攻博 土課程了. 2003 より Microsoft Research Asia にてコンピュータビジョンの研究に 従事.主任研究員.特に光学,ビデオ解 析の研究に興味をもつ. 2009 より大阪大

学招聘准教授. International Journal of Computer Vision, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, The Visual Computer 論文誌編集委員. 博士 (工学). IEEE Senior 会員.



八木 康史 (正員)

1983 阪大・基礎工・制御卒.1985 同大 大学院修士課程了.同年三菱電機(株)入 社.同社産業システム研究所にてロボット ビジョンの研究に従事.1990 大阪大学基 礎工学部情報工学科助手.同学部システム 工学科講師,同大学院助教授を経て、2003

より同大学産業科学研究所教授.1995~1996 英オックスフォー ド大学客員研究員,2002 仏ピカルディー大学招聘助教授,コン ピュータビジョンに関する研究に従事.情報処理学会フェロー, IEEE,情報処理学会,日本ロボット学会各会員.博士(工学).