

# 光線収束性を用いた透明物体表面の五次元推定の高精度化

井手口 裕太<sup>1,a)</sup> 浦西 友樹<sup>1</sup> 吉元 俊輔<sup>1</sup> 黒田 嘉宏<sup>1</sup> 大城 理<sup>1</sup>

概要：本研究では、透明物体を輻輳角の小さい複数のカメラで撮影した際に生じる辺縁での光学的部分恒常性を利用して、透明物体の表面の奥行きおよび法線方向を推定する手法を提案する。提案手法では、透明物体をライトフィールドカメラで撮影し、光線収束性を用いて透明物体の奥行きおよび法線方向を推定する。本稿では、手法に視差を更新する処理を導入することで奥行きの推定精度が向上することを示す。

## 1. はじめに

コンピュータビジョンの分野において透明物体の表面形状計測は未だ難しい問題の一つである。物体表面の形状を計測する一般的な手法として、光学的恒常性を利用して対応点を同定するステレオマッチングベースの計測手法があるが、透明物体などの非ランバート面では光学的恒常性が維持されないため、三次元形状の計測は困難となる。透明物体の表面形状を計測するための手法としては、偏光を利用する手法 [1] や蛍光発光液に浸す手法 [2] などがある。しかしこれらの手法は、透明物体の周囲を光源で覆う必要があったり、透明物体を蛍光発光液に浸す必要があるなどの問題がある。これらの問題を解決する手法として、ライトフィールドを用いて薄い透明物体の表面形状を計測する手法 [3] や厚みのある透明物体を識別する手法 [4] がある。しかしながら前者の手法は、薄い透明物体を対象としているため、厚みのある透明物体の表面形状を計測することを想定していない。後者の手法は、識別を目的としており、表面形状を計測することを対象とした手法ではない。

本研究では、透明物体を輻輳角の小さい複数のカメラで撮影した際に生じる辺縁での光学的部分恒常性を利用して、透明物体の表面の奥行きおよび法線方向を推定する手法を提案する。図 3 に示すように透明物体をライトフィールドカメラ [5] で撮影し、得られた光線が同一点からの光線であるかの度合いを表す光線収束性を用いて透明物体の表面の初期奥行きおよび法線方向を推定し、これらの情報から視差を更新することでより正確な奥行きを推定する。ライトフィールドカメラは、輻輳角の小さい複数のカメラにより構成されるカメラアレイで撮影した場合に得られる画像

(アレイ画像)と同等の画像を取得できる。したがって、提案手法ではライトフィールドカメラ一台で透明物体の表面の奥行きおよび法線方向を推定することができる。本稿では、ライトフィールドカメラにより撮影した画像を模擬したシミュレーション画像を用いた実験によって、視差を更新することで奥行きの推定精度が向上することを示す。

## 2. 関連研究

物体の三次元形状を計測するため、これまでに様々な手法が開発されてきたが、物体表面での光学的恒常性を仮定した手法では、金属のような鏡面反射を伴う表面を有する物体や、プラスチックのような表面下散乱を伴う物体、ガラスのような透明物体など、表面がランバート面でない物体の形状を計測することは未だ困難である。これらの対象の三次元形状を計測するための研究として、偏光を利用して金属の三次元形状を計測する研究 [6] や、単一散乱光を利用して半透明な物体の三次元形状を計測するための研究 [7] がある。

物体内部の光線の屈折および透過を含む透明物体の三次元形状を計測する研究として、偏光を利用する手法 [1] と蛍光発光液に浸す手法 [2] がある。偏光を利用する手法では、透明物体の表面で反射した光源からの光を、偏光板を通してカメラで観測する。入射光の入射角と同じ角度で反射する反射光は、反射角に応じて偏光強度が変化する。特定の角度の偏光を通過させる偏光板を回転しながら観測することで、透明物体の表面の各点における角度を計測でき、そこから透明物体の表面形状を求めることができる。しかし、この手法は透明物体を囲むように光源を配置しなければならず、装置が大型化したり、透明物体の背面の形状が平面に限られるといった問題がある。蛍光発光液に浸す手法は、透明物体を蛍光発光液に浸し、レーザによるスリット光を照射することで透明物体の形状を計測する。ス

<sup>1</sup> 大阪大学  
Osaka University

<sup>a)</sup> ideguchi@bpe.es.osaka-u.ac.jp

リット光は蛍光液部分では蛍光による発光を引き起こす。一方、透明物体の内部では発光しないため、側面からカメラで観測することでスリット光を照射した断面の形状を計測できる。しかし、この手法では形状を計測するために透明物体を蛍光液に浸す必要があり、計測後に透明物体の洗浄などの手間がかかる。

他にも近年、透明物体を識別するために、ライトフィールドを記録することが可能なカメラを用いて、透明物体を通過する光線の屈折から透明物体を識別する研究なども行われている [4]。この手法は、透明物体がある場合とない場合のライトフィールドを記録することで、置かれている透明物体があらかじめ登録されている透明物体のどれか識別できる。しかし、この手法は識別を目的としており、透明物体の表面形状を計測することを前提とはしていない。透明物体の表面形状を計測するための他の手法として、ライトフィールドを利用する手法がある [3], [8]。背景の光源を色の付いた透明フィルムで符号化し、その前にレンズアレイを配置することで、背景の光線が位置と角度により符号化する。したがって、透明物体を通過した光をカメラで観測することで、背景の光線の位置と角度を求めることができ、透明物体の表面形状を計測できる。しかし、この手法は透明物体を薄レンズと仮定し、背景からカメラで観測される光線は一度しか屈折しないことを前提に表面形状を計測する。したがって、厚みを持つ透明物体の表面形状を計測することはできない。このように、厚みのある透明物体の形状を非侵襲的に計測する手法は未だ確立していない。

本研究では、これらの手法と異なる新たなアプローチを提案する。提案手法では、透明物体を輻輳角の小さい複数のカメラで撮影した際に生じる辺縁での光学的部分恒常性を利用して、透明物体の表面の奥行きおよび法線方向を推定する。図3に示すようにランダムパターンの前に配置した透明物体をライトフィールドカメラ [5] で撮影し、光線収束性を用いて透明物体の表面の奥行きおよび法線方向を推定する。ライトフィールドカメラによって得られる画像は、輻輳角の小さいカメラアレイによって撮影した画像と同様の画像を得られる。したがって、提案手法ではライトフィールドカメラ一台で透明物体の表面の奥行きおよび法線方向を推定できるため、システムの構築が容易となる。

### 3. 光学的部分恒常性

光学的恒常性とは、複数の視点から物体を観測した際に、物体の任意の一点はどの視点からでも同じように見えるという性質である。ランバート面では光は等方的に拡散反射するため、物体上の一点において見かけの色が視点に依存せず、すなわち光学的恒常性が維持される。したがってランバート面の物体では、光学的恒常性を利用して対応点を同定し、ステレオマッチングベースで計測することが可能である。ガラスなどの透明物体は、外部からの光線が

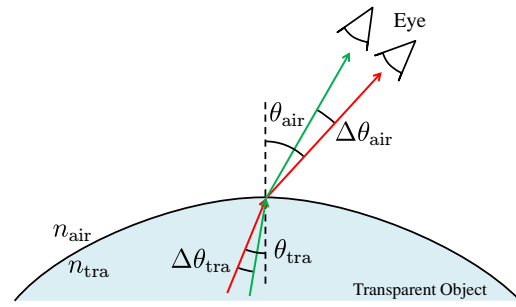


図1 透明物体での光の屈折

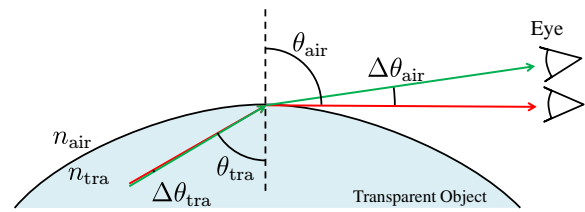


図2 透明物体の辺縁での光の屈折

物体内部に透過して進入する性質を持つ。また、空気中と物体内部では屈折率が異なるため、空気中と物体内部の境界で入射光は屈折する。さらに、入射光の一部は物体表面で反射する。したがって、透明物体では物体上の同一の点であっても視点によって見かけの色が異なるため、光学的恒常性が維持されず、三次元形状の計測は困難となる。

本稿では、物体内部の屈折率が一定で、物体内部で光を散乱または屈折しないものと仮定する。図1に示すように、透明物体を見た時の光の屈折を考える。この時の光の屈折角の関係はスネルの法則 [9] より以下ようになる。

$$n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{tra}} \sin \theta_{\text{tra}} \quad (1)$$

$$\theta_{\text{tra}} = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_{\text{air}}}{n} \right) \quad (2)$$

$n$  は  $n_{\text{tra}}/n_{\text{air}}$  である。つぎに、 $\theta_{\text{air}}$  の変化に対する  $\theta_{\text{tra}}$  の変化を考えると以下のように表現できる。

$$\Psi(\theta_{\text{air}}) = \frac{\partial \theta_{\text{tra}}}{\partial \theta_{\text{air}}} = \frac{\cos \theta_{\text{air}}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\text{air}}}} \quad (3)$$

したがって、 $\Delta \theta_{\text{tra}}$  は  $\Delta \theta_{\text{air}}$  を用いて以下のように書ける。

$$\Delta \theta_{\text{tra}} \approx \frac{\partial \theta_{\text{tra}}}{\partial \theta_{\text{air}}} \Delta \theta_{\text{air}} = \frac{\cos \theta_{\text{air}}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\text{air}}}} \Delta \theta_{\text{air}} \quad (4)$$

透明物体の周囲が空気であるとき  $1 < n \leq 2.5$  であるため、 $\cos \theta_{\text{air}} \neq 0$  となる領域であれば、視線の角度が変化することで  $\theta_{\text{tra}}$  も変化する。特に、透明物体の中央付近において  $\theta_{\text{air}} \approx 0$  となる領域では  $\Delta \theta_{\text{tra}} = \Delta \theta_{\text{air}}/n$  となる。このように、透明物体では、多くの領域において光学的恒常性は維持されない。

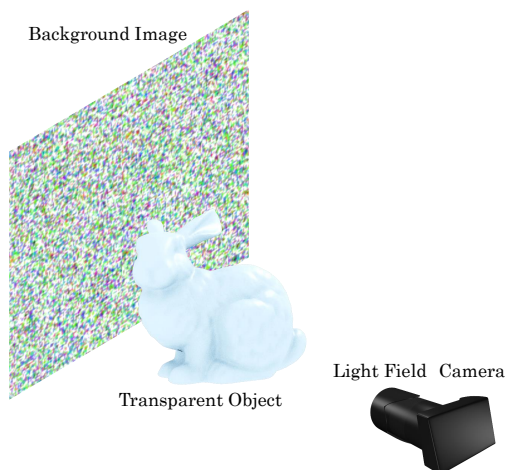


図 3 提案手法の概要

一方で図 2 に示すように、透明物体の辺縁を見た時の光の屈折を考える。本研究では、透明物体の表面の法線と視線の成す角が約  $\pi/2$  になる部分を透明物体の辺縁と定義する。式 (3) より  $\theta_{\text{air}} = \pi/2$  のときには  $\Psi(\theta_{\text{air}}) = 0$  となるため、 $\Delta\theta_{\text{tra}} = 0$  となる。また、 $\Psi(\theta_{\text{air}})$  を  $\theta_{\text{air}} = \pi/2$  のまわりでテイラー展開し、二次以降の微小項を無視すると以下ようになる。

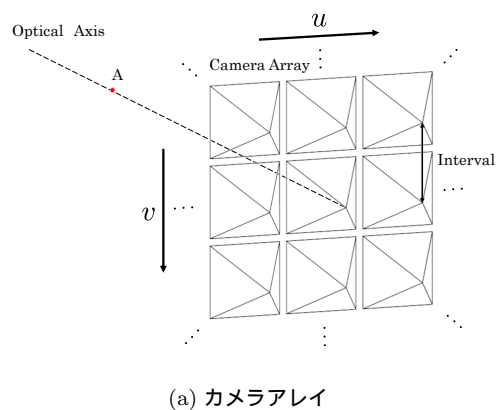
$$\Psi(\theta_{\text{air}}) = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}} \left( \frac{\pi}{2} - \theta_{\text{air}} \right) \quad (5)$$

この式より  $\Psi(\theta_{\text{air}})$  は、 $\theta_{\text{air}}$  に対して単調減少であり、 $|\Psi(\theta_{\text{air}})|$  は  $\theta_{\text{air}} = \pi/2$  に近いほど小さく、 $\Delta\theta_{\text{tra}}$  は 0 に近づく。また、 $n$  が高いほど  $\Psi(\theta_{\text{air}})$  は小さくなる。このように、透明物体の辺縁では、視線の角度の変化に対して  $\theta_{\text{tra}}$  の変化が非常に小さいため、光学的恒常性が維持される。この現象を本研究では光学的部分恒常性と呼ぶ。本研究では、この透明物体の辺縁における光学的部分恒常性を利用して、透明物体の表面の奥行きおよび法線方向を推定する。

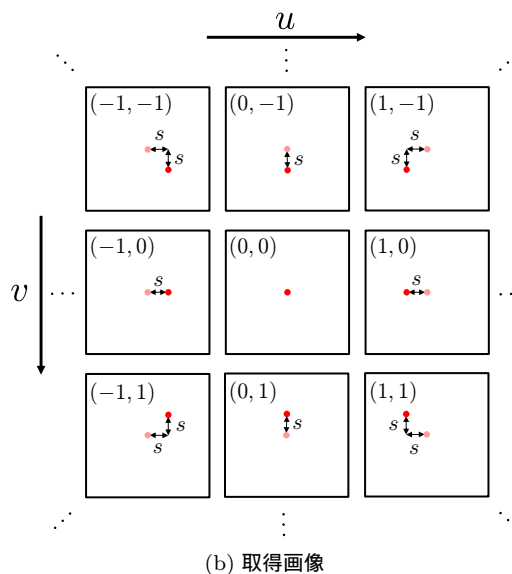
## 4. 提案手法

### 4.1 概要

提案手法の概要を図 3 に示す。まず、ライトフィールドカメラと背景画像の間に透明物体を配置し撮影する。周期的に同じパターンが現れることを避けるために、背景画像にはランダムパターン画像を利用する。ライトフィールドカメラは、輻輳角の小さい複数のカメラにより構成されるカメラアレイで撮影した場合に得られる画像(アレイ画像)と同等の画像を取得できる。つぎに、取得したアレイ画像間における透明物体の表面の対応点を探索することで初期視差を求める。本研究では、透明物体の表面の法線とカメラの光軸の成す角が直角になる部分を透明物体の辺縁と定義し、透明物体の辺縁を対応点として探索する。透明物体は、見る角度によって透明物体を通して見える背景の場所



(a) カメラアレイ



(b) 取得画像

図 4 取得されるカメラアレイ画像

が異なるため、探索が困難である。一方、透明物体の辺縁は、見る角度によらず同じように見える光学的部分恒常性により探索することが可能である。つぎに、視差を更新することで、推定精度の向上を図る。そのために、光線収束性から面の法線方向および屈折の影響を求める。視差の更新処理では、初期視差、面の法線方向および屈折の影響をパラメータとする誤差関数を定義し、誤差関数の値が最小となる視差を求める。そして、更新した視差を用いて、透明物体の表面のライトフィールドカメラからの距離を計算する。最終的な表面形状は、ライトフィールドカメラからの距離として推定される。これにより、透明物体の辺縁の表面形状を推定することができる。

### 4.2 光線収束性

図 4 に、光軸上の点を見た時のカメラアレイ画像を示す。この点はカメラの位置に応じて中心からズレて写る。このズレて写った点へのカメラからの光線は、すべて光軸上の点に集光することになる。したがって、ズレ量  $s$  を変化させることで、カメラからの光線を任意の距離に集光することができる。透明物体を通過する光は透明物体の表面で屈折するため、多くの光線は透明物体の形状により一点

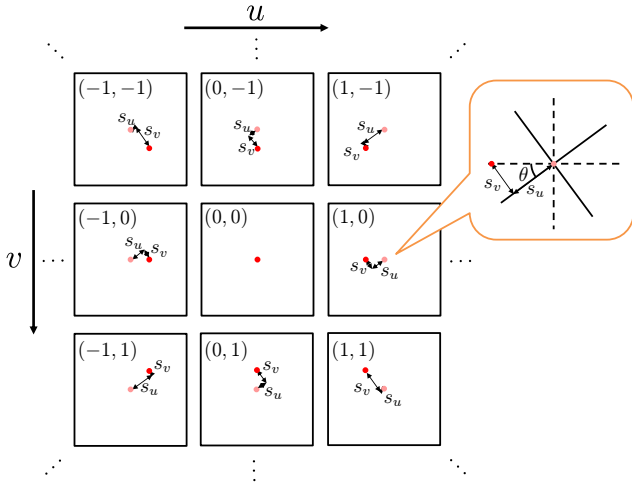


図 5 ズレ量のベクトル化

で収束せず，収束する光線と収束しない光線が発生する．この光線の収束性を本研究では，光線収束性と呼ぶ．カメラ  $(u, v)$  により取得される画像の輝度を  $I^{(u,v)}(x, y)$  とし，ズレ量  $s$  に応じて取得画像の輝度  $I^{(u,v)}(x, y)$  をズレを戻す方向に平行移動した画像の輝度を  $I_{sh}^{(u,v)}(x, y, s)$  とし，カメラの総数を  $N_{uv}$  とするとき，光線収束性を以下の様なエネルギー場により表現する．

$$E_C(x, y, s) = \sum_{x', y'} \sum_{u, v} \{I_{sh}^{(u,v)}(x', y', s) - \sum_{u', v'} I_{sh}^{(u', v')}(x', y', s)/N_{uv}\}^2 \quad (6)$$

$E_C(x, y, s) = 0$  のとき光線は一点に収束し，多くの光線が一点に収束しない場合に  $E_C(x, y, s)$  は大きくなる．したがって，以下の様に  $E_C(x, y, s)$  が最小になる  $s$  を求めることで，透明物体の表面の辺縁と背景に対応する点を探索することで，初期視差  $\hat{s}_0(x, y)$  が得られる．

$$\hat{s}_0(x, y) = \arg \min_s E_s(x, y, s) \quad (7)$$

#### 4.3 法線方向推定

ズレ量  $s$  を図 5 に示すように， $s_u, s_v, \theta_s$  により新たに表現し直す．これにより，光線収束性を示すエネルギー場を以下の様に書きなおすことができる．

$$E_C(x, y, s_u, s_v, \theta_s) = \sum_{x', y'} \sum_{u, v} \{I_{sh}^{(u,v)}(x', y', us'_u, vs'_v) - \sum_{u', v'} I_{sh}^{(u', v')}(x', y', us'_u, vs'_v)/N_{uv}\}^2 \quad (8)$$

$$s'_u = |s_u \cos \theta_s + s_v \sin \theta_s| \quad (9)$$

$$s'_v = |s_v \cos \theta_s - s_u \sin \theta_s| \quad (10)$$

図 6 に示すように，辺縁における面の法線が  $v$  方向となる点  $(x, y)$  での  $E_C$  を  $\theta_s = 0$  とし，ズレ量  $s_u, s_v$  を軸

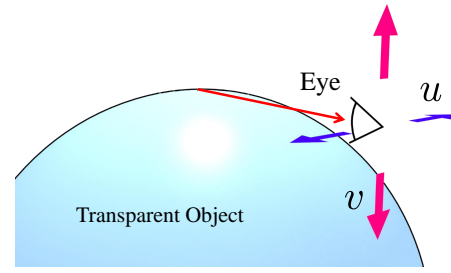


図 6 視線の移動

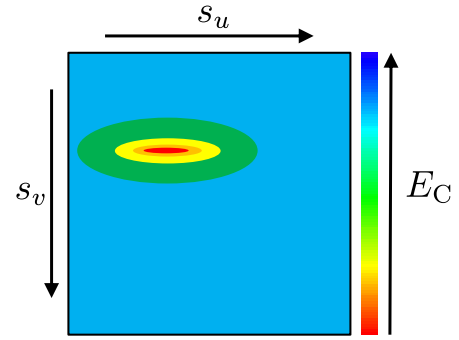


図 7 光線収束性マップ

とした画像で表現したものが図 7 の光線収束性マップである．図 6 に示すように，透明物体の辺縁を観測したとき， $v$  方向に視点が変化しても見かけの色は変化しない．そのため，図 6 のように，辺縁の面の法線が  $v$  方向に向いている面では， $s_v$  が正しいとき誤差関数  $E_C$  は小さくなり，逆にそれ以外では大きくなる．一方， $u$  方向に視点が変化した場合には，光学的部分恒常性が維持されず，見かけの色が異なることになる．したがって， $s_u$  が正しいときとそれ以外の  $E_C$  の違いは小さくなる．したがって，図 7 に示すように，光線収束性マップにおける分布は長軸が  $s_u$  方向の楕円形状になる．逆に，辺縁における面の法線が  $u$  方向に向いている場合には，長軸が  $s_v$  方向の楕円形状になる．したがって，光線収束性マップにおける分布の楕円形状の長軸の向きを調べることで，辺縁の面の法線の向きを推定できる．この光線収束性マップにおける分布の楕円形状の長軸の向きは， $\theta_s$  を変化させることでも変化する．図 8 に， $\theta_s$  と光線収束性マップの関係の例を示す． $\theta_s$  を変化させた際の  $s_u$  と  $s_v$  の軸に対して，面の法線の向きが平行あるいは垂直の時に，光線収束性マップにおける分布の楕円形状の長軸と短軸の長さの比が最大となる．したがって，図 8(a) に示すような，光線収束性マップにおける分布の楕円形状の  $s_u$  方向の長さ  $l_u$  と  $s_v$  方向の長さ  $l_v$  の比が最大となるときの  $\theta_s$  を  $\hat{\theta}_s$  とするとき，法線方向  $\theta_{est}$  は以下の式より求めることができる．

$$\theta_{est} = \begin{cases} \hat{\theta}_s & l_u \geq l_v \\ \hat{\theta}_s + \frac{\pi}{2} & l_u < l_v \end{cases} \quad (11)$$

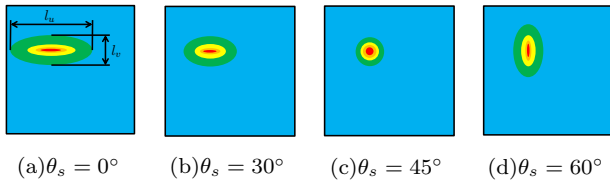
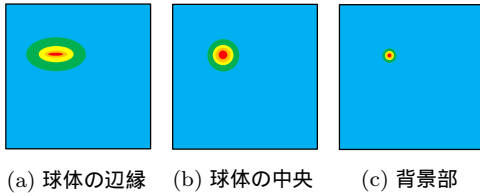


図 8 光線収束性マップの  $\theta$  依存性



(a) 球体の辺縁 (b) 球体の中央 (c) 背景部

図 9 光線収束性マップへの屈折の影響

#### 4.4 透明物体領域推定

図 9 に，球形の透明物体の辺縁，中央を通過した場合と背景での光線収束性マップを記す．透明物体を通過し屈折した場合の光線収束性マップに対して，屈折せずに背景に到達した場合の光線収束性マップは，最小値での勾配が大きい．したがって，最小値からの勾配を調べることで，光線が屈折したかどうかを調べることができる．光線収束性マップにおける最小の値を  $E_{\min}(x, y)$  とするとき，以下の式より屈折の影響  $R(x, y)$  を求めることができる．

$$R(x, y) = \frac{\nabla_{s_u, s_v}^2 E_C(x, y, s_u, s_v, 0)|_{s_u=\hat{s}_0, s_v=\hat{s}_0}}{E_{\min}(x, y)} \quad (12)$$

$$\nabla_{s_u, s_v}^2 = \frac{\partial^2}{\partial s_u^2} + \frac{\partial^2}{\partial s_v^2} \quad (13)$$

#### 4.5 視差の更新

初期視差は，光学的部分恒常性を利用して奥行きを推定するため，辺縁以外の領域においては正しく推定することが困難である．したがって，視差を更新することによって奥行き推定の精度を向上する．視差を更新するための評価関数として，本稿では以下のような誤差関数を定義する．

$$E_{s,n}(x, y, s) = k_A F_{\text{ave}}(x, y, s) + k_B F_g(x, y, s) + k_C F_{g0}(x, y, s) \quad (14)$$

$k_A, k_B, k_C$  は各項の影響を決める重み係数である．第一項の  $F_{\text{ave}}(x, y, s)$  は，重みを考慮した移動平均である．第二項の  $F_g(x, y, s)$  は，重みを考慮した勾配の移動平均である．第三項の  $F_{g0}(x, y, s)$  は，輪郭において  $\hat{s}_0$  の勾配を保存する項であり， $\hat{s}_0$  の勾配から計算される法線の方向と  $\theta_{\text{est}}$  が一致しているほど値が大きくなる．輪郭は， $R$  を二値化して輪郭を抽出することで求める．また，最も外側の輪郭の内部を塗りつぶすことで，シルエットを求める．重みは，シルエットの外側を 0 とし，シルエットの内部の輪郭を 1 とし，シルエット内の輪郭から距離に応じて線形に減衰し，最も輪郭から遠い位置で 0 になるように設定した．

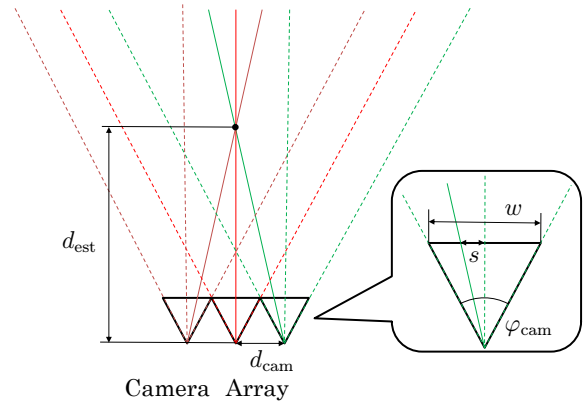


図 10 視差と距離の関係

シルエット内の輪郭付近を除いた領域において，以下に示すような誤差関数  $E_{s,n}$  を最小化することで，最終的な推定視差  $\hat{s}_n$  を求める．

$$\hat{s}_{n+1}(x, y) = \hat{s}_n(x, y) - \frac{k_s}{\sum_{x,y} E_{s,n}(x, y, s)} \frac{\partial E_{s,n}(x, y, s)}{\partial s} \quad (15)$$

$k_s$  は更新量を決める 0 以上の係数であり， $\sum_{x,y} E_{s,n}(x, y, s)$  により正規化される．式 (15) の処理を任意の回数または第二項の値がしきい値以下になるまで計算を繰り返す．

#### 5. 距離の計算

図 4 に示すように，光軸上の一点をカメラアレイで見た時，この点はカメラの位置に応じて中心からズレて写り，このズレ量  $s$  は，カメラの画角を  $\varphi_{\text{cam}}$  とし，カメラ間距離を  $d_{\text{cam}}$  とし，画像のピクセル幅を  $w_{\text{cam}}$  とし，光軸上の点までの距離を  $l_{\text{cam}}$  とするとき，以下の式で表わせる．

$$s = \frac{w_{\text{cam}} d_{\text{cam}}}{2 l_{\text{cam}} \tan \frac{\varphi_{\text{cam}}}{2}} \quad (16)$$

したがって，推定視差  $\hat{s}_n(x, y)$  から推定距離  $\hat{d}_{\text{est}}(x, y)$  への変換は以下の様にして行うことができる．

$$\hat{d}_{\text{est}}(x, y) = \frac{w_{\text{cam}} d_{\text{cam}}}{2 \hat{s}_n(x, y) \tan \frac{\varphi_{\text{cam}}}{2}} \quad (17)$$

#### 6. シミュレーション実験

視差の更新より透明物体の表面の奥行き推定精度が向上することを確かめるため，シミュレーションにより生成した画像より，透明物体の表面形状を推定し，比較を行った．

##### 6.1 結果

図 11 に示すように，ライトフィールドカメラを背景画像から距離 120 mm に配置し，透明物体をライトフィールド

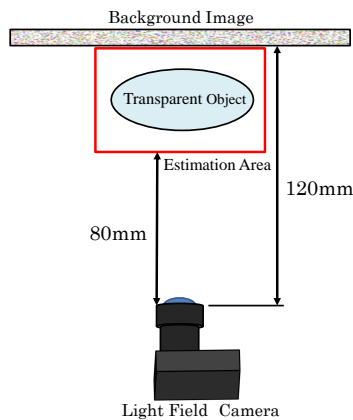


図 11 実験状況

ドカメラから距離 80 mm の間に配置した．透明物体の屈折率は 1.51 とした．透明物体をライトフィールドカメラにより撮影した場合に得られるアレイ画像は，Blender[10] を用いて作成した．作成した画像の解像度は 1078 × 748 画素とし，カメラの画角は 60° とした．カメラアレイは，縦横 6 × 6 個のカメラで構成され，カメラ間距離を 0.3 mm とした．

まず，単純な形状である球状の透明物体で推定実験を行った．図 12 に，取得したカメラアレイ画像の一部を示す．これらの画像を元に，透明物体の表面形状をライトフィールドカメラからの距離として推定した．推定範囲は図 11 に示すように，距離 80 mm ~ 120 mm の間とした．図 13 に，推定した結果を示す．(a) は真値，(b) は初期視差から求めた奥行き，(c) が推定結果である．また，(d) は推定した法線方向であり，(e) は屈折の影響であり，(f) は視差更新の際の計算領域，(g) は輪郭画像，(h) は重みである．推定結果は，これらの画像より式 (15) をパッチサイズ 5 × 5pixel として計算し，解像度 100 × 100pixel で求めた．つぎに，トーラス状の透明物体とトーラス状の内側を平面で被った形状である円盤状の透明物体でそれぞれ実験を行った．取得したカメラアレイ画像の一部および推定結果を図 14 ~ 17 に示す．また，複雑な形状である Stanford Bunny[11] 状および Stanford Dragon[11] 状の透明物体においても実験を行った．取得したカメラアレイ画像の一部および推定結果を図 18 ~ 21 に示す．また，真値と初期推定結果および推定結果の平均誤差を求めた結果を表 1 に示す．

対象	初期推定結果	推定結果
球状	1.86	0.456
トーラス状	0.96	1.51
円盤状	5.16	1.06
Bunny 状	1.33	1.16
Dragon 状	0.832	0.824

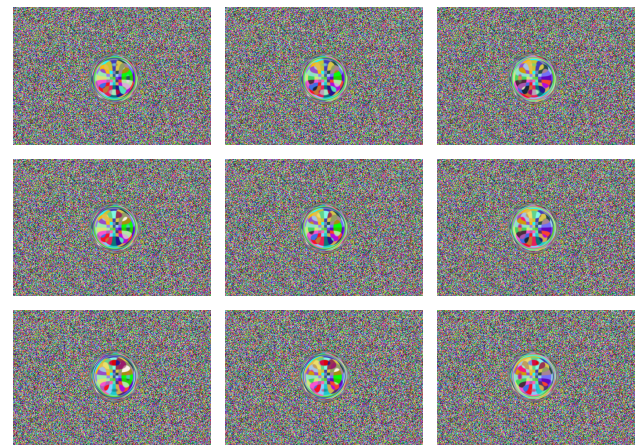


図 12 球状の透明物体のカメラアレイ画像の一部

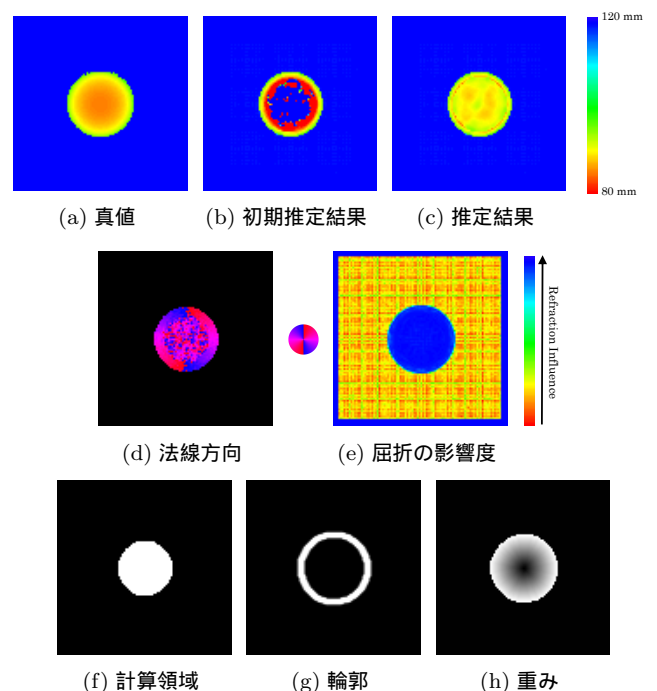


図 13 球状の透明物体の推定結果

## 6.2 考察

図 13(b) を見ると，球状の透明物体では，背景および透明物体の辺縁では距離を推定できるが中央では推定できないことが確認できる．一方，(c) を見ると，視差を更新することで，中央においても概ね推定できていることが確認できる．また (d) では，辺縁において法線の方向が推定できていることが確認できる．また (e) では，透明物体の存在している領域のみの区別ができていないことが確認できる．図 15(b) を見ると，トーラス状の透明物体は，すべての領域を辺縁と見なすことができたため，概ね推定できていることが確認できる．しかし，(c) に示すように，視差を更新することで内側の領域での正しく推定できなくなっていることが確認できる．これは，視差を更新する際に内側の領域を辺縁であると見なすことができないことが原因であると考えられる．図 17 の円盤状の物体では，(b) に示すように辺縁のみ推定できているが中央は推定できていない．一

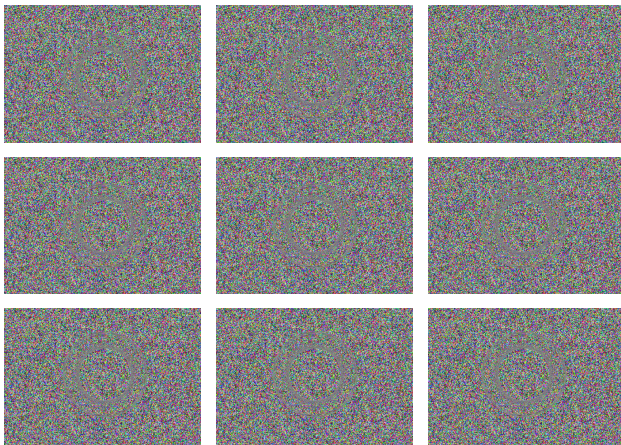


図 14 トーラス状の透明物体のカメラレイ画像の一部

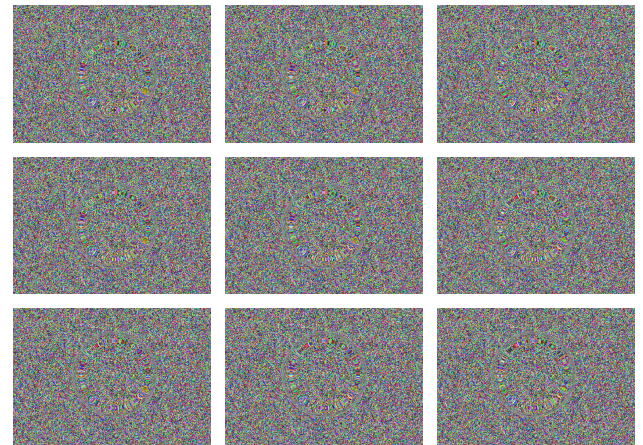
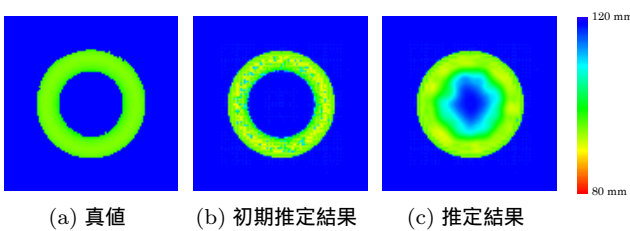
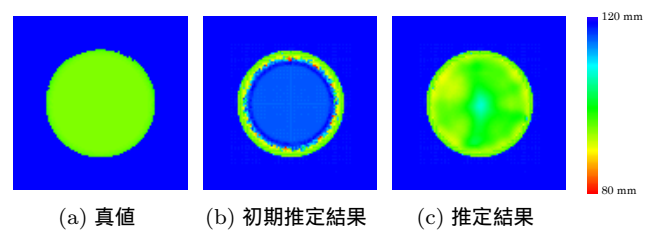


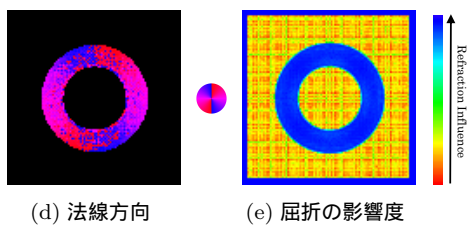
図 16 円盤状の透明物体のカメラレイ画像の一部



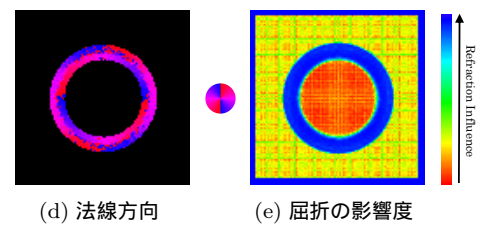
(a) 真値 (b) 初期推定結果 (c) 推定結果



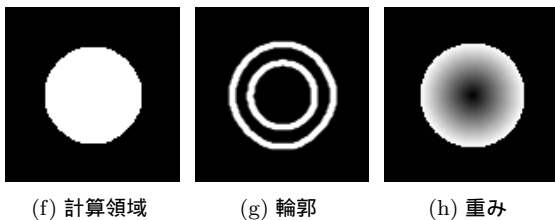
(a) 真値 (b) 初期推定結果 (c) 推定結果



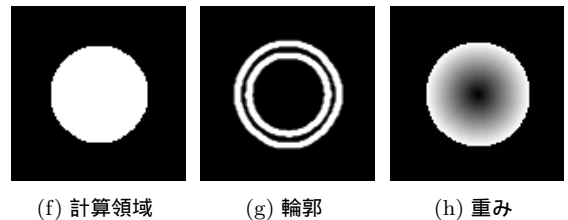
(d) 法線方向 (e) 屈折の影響度



(d) 法線方向 (e) 屈折の影響度



(f) 計算領域 (g) 輪郭 (h) 重み



(f) 計算領域 (g) 輪郭 (h) 重み

図 15 トーラス状の透明物体の推定結果

図 17 円盤状の透明物体の推定結果

方 (c) では、視差の更新により中央の推定結果が改善されたことが確認できる。また、図 15 と図 17 を比べると、(b) では、トーラス状の透明物体か円盤状の透明物体のどちらであるかを区別できないが、(c) に示すように、視差を更新することでトーラス状の透明物体か円盤状の透明物体のどちらであるかを区別できるようになることが分かる。つぎに図 19 および 21 において、(b) と (c) を比べると、奥行きの変化が滑らかになっていることが確認できる。また、表 1 を見ると、トーラス状の透明物体を除いて、視差を更新することで誤差が小さくなっていることが確認できる。これらの結果から、視差の更新によって形状が単純でひと塊の物体ほど精度が向上することが分かる。したがって、物体の形状により視差の更新処理を導入するかどうかを判断することで、精度の高い透明物体形状推定が可能になる。

## 7. おわりに

本研究では、透明物体を輻輳角の小さい複数のカメラで撮影した際に生じる辺縁での光学的部分恒常性を利用して、透明物体の表面形状を推定する手法を提案した。提案手法では、輻輳角の小さい複数のカメラで撮影した場合と同じ画像を取得できるライトフィールドカメラを利用する。ランダムパターンの前に配置した透明物体をライトフィールドカメラで撮影し、光線収束性を用いて透明物体の表面形状を推定する。本稿では、視差を更新することで精度が向上することをシミュレーション画像を用いた推定実験により確認した。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (C) 16K00272 による。

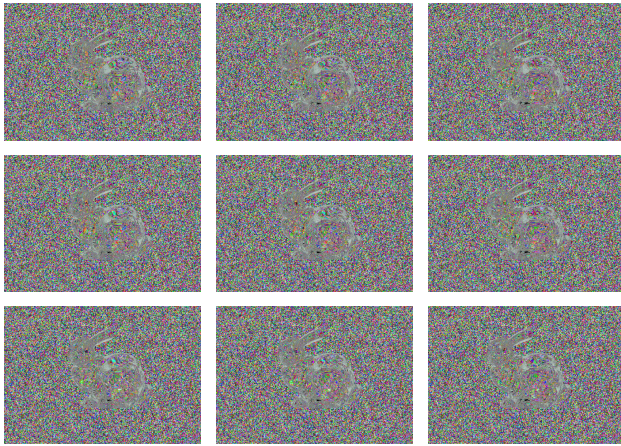


図 18 Bunny 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

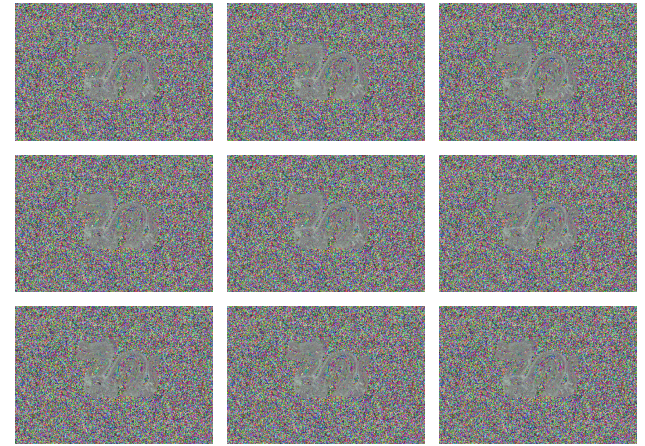


図 20 Dragon 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

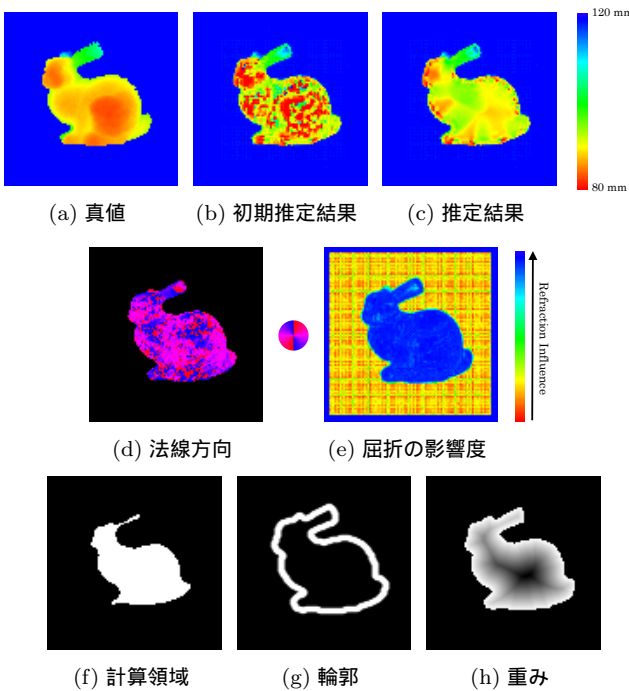


図 19 Bunny 状の透明物体の推定結果

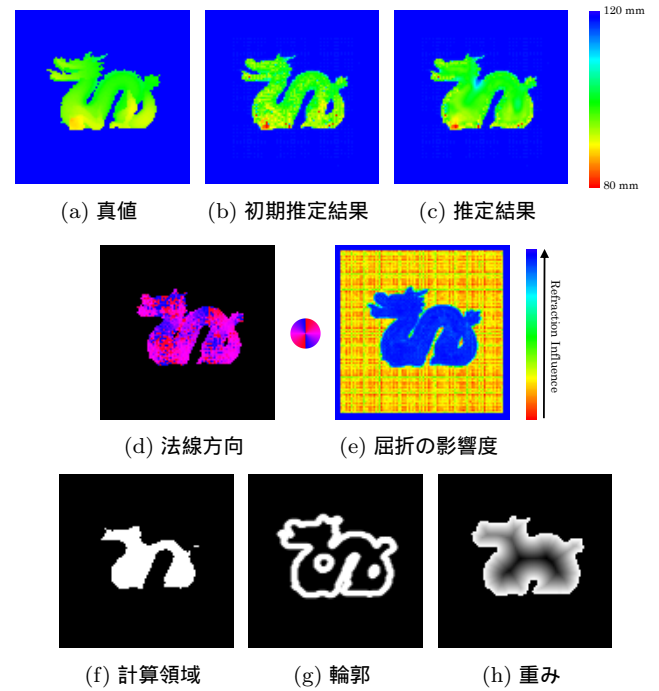


図 21 Dragon 状の透明物体の推定結果

参考文献

[1] Daisuke Miyazaki and Katsushi Ikeuchi. Inverse polarization raytracing: estimating surface shapes of transparent objects. In *Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 910–917. IEEE, 2005.

[2] M. B. Hullin, M. Fuchs, I. Ihrke, H. P. Seidel, and H. Lensch. Fluorescent immersion range scanning. *ACM Trans. Graphics*, Vol. 27, No. 3, 2008.

[3] Gordon Wetzstein, Wolfgang Heidrich, and Ramesh Raskar. Computational schlieren photography with light field probes. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 110, No. 2, pp. 113–127, 2014.

[4] K. Maeno, H. Nagahara, A. Shimada, and R. Taniguchi. Light field distortion feature for transparent object recognition. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2786–2793, 2013.

[5] R. Ng, M. Levoy, M. Brdif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. *Stanford University Computer Science Tech Report CSTR*, 2005.

[6] K. Koshikawa. A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects. In *Proc. International Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 493–495, 1979.

[7] C. Inoshita, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, and Y. Yagi. Shape from single scattering for translucent objects. *12th European Conference on Computer Vision (ECCV2012)*, 2012.

[8] Gordon Wetzstein, David Roodnick, Wolfgang Heidrich, and Ramesh Raskar. Refractive shape from light field distortion. In *Proc. IEEE International Conf. Computer Vision*, pp. 1180–1186. IEEE, 2011.

[9] Richard P Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, chapter 26. Basic Books, 1963.

[10] Blender. <https://www.blender.org/> (reference 2016-10-06).

[11] The stanford 3d scanning repository. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/> (reference 2015-10-06).