

辺縁での光学的部分恒常性に基づく透明物体の表面形状推定

井手口 裕太^{1,a)} 浦西 友樹² 吉元 俊輔¹ 黒田 嘉宏¹ 大城 理¹

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，透明物体の表面形状を推定する手法を提案する．提案手法では，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，ステレオ視を用いて透明物体の表面形状を推定する．本稿では，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た結果を示す．

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．ランバート面を有する物体を対象と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，物体への侵襲性が高い．他にも，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．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，透明物体の表面形状を推定する手法を提案する．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，ステレオ視を用いて透明物体の表面形状を推定する．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形状を推定することができる．本稿では，透明物体の辺縁において見る角度がわずかに違う場合には光学的恒常性が維持される光学的部分恒常性を利用して，透明物体の辺縁の表面形状を推定する手法を説明する．さらに，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から，透明物体の表面形状を推定した結果を示す．

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 [8] 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うように光源を配置しなければならない，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

¹ 大阪大学
Osaka University

² 京都大学
Kyoto University

^{a)} ideguchi@bpe.es.osaka-u.ac.jp

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], [9]。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、透明物体の表面形状を推定する。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、ステレオ視を用いて透明物体の表面形状を推定する。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形状を推定できるため、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。しかし、透明物体では物体上の同一の点であって

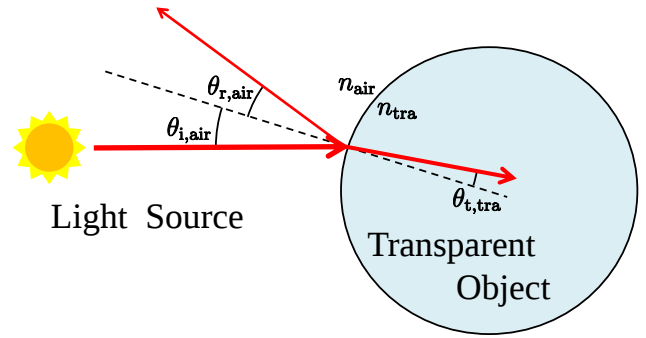


図 1 透明物体での光の屈折

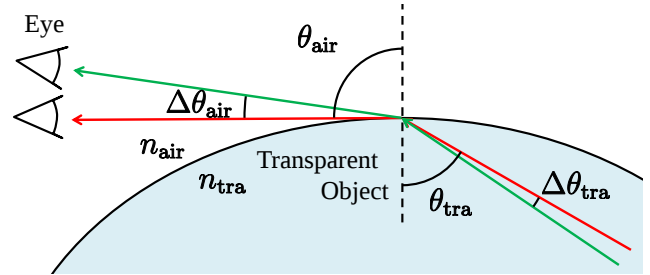


図 2 透明物体の辺縁での光の屈折

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。

ガラスなどの透明物体は、外部からの光線が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異なるため、図1のように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。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、入射角を $\theta_{i,air}$ 、屈折角を $\theta_{t,tra}$ 、反射角を $\theta_{r,air}$ 、空気の屈折率を n_{air} 、透明物体の屈折率 n_{tra} とするとき、これらの関係はスネルの法則 [10] にしたがって以下のようなになる。

$$n_{air} \sin \theta_{i,air} = n_{tra} \sin \theta_{t,tra} \quad (1)$$

$$\theta_{i,air} = \theta_{r,air} \quad (2)$$

ここで図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。本研究における辺縁とは、透明物体の表面の法線と視線の角度が約 90° になる部分である。この時の光の屈折角の関係はスネルの法則より以下のようなになる。

$$n_{air} \sin \theta_{air} = n_{tra} \sin \theta_{tra} \quad (3)$$

$$\theta_{tra} = \sin^{-1}(n \sin \theta_{air}) \quad (4)$$

n は n_{air}/n_{tra} である。ここで、 θ_{air} の変化に対する θ_{tra} の変化を考えると以下のように表現できる。

$$\frac{\partial \theta_{tra}}{\partial \theta_{air}} = \frac{n \cos \theta_{air}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta_{air}}} \quad (5)$$

ここで、透明物体を一般的なガラスであると仮定すると

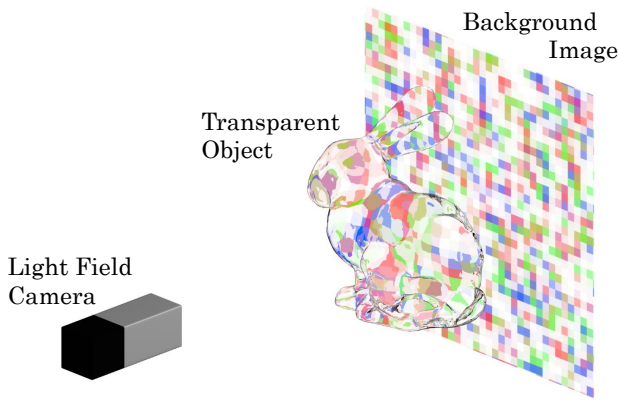


図 3 提案手法の概要

$n = n_{\text{air}}/n_{\text{tra}} = 1/1.51$ となり、以下ようになる。

$$\frac{\partial \theta_{\text{tra}}}{\partial \theta_{\text{air}}} = \frac{\cos \theta_{\text{air}}}{\sqrt{(1.51)^2 - \sin^2 \theta_{\text{air}}}} \quad (6)$$

したがって、 $\theta_{\text{air}} \approx 90^\circ$ のときには $\partial \theta_{\text{tra}}/\partial \theta_{\text{air}} \rightarrow 0$ となる。また、ライトフィールドカメラをカメラアレイとみなした時の輻輳角の最大値を 5° と仮定した場合、 $\theta_{\text{air}} = 85^\circ$ のときには $\partial \theta_{\text{tra}}/\partial \theta_{\text{air}} = 0.08$ となる。 θ_{air} が $85^\circ \sim 90^\circ$ の領域において、式 (6) は単調減少であるため、 $\Delta \theta_{\text{tra}}$ は以下の式で表される。

$$\Delta \theta_{\text{tra}} \approx \frac{\partial \theta_{\text{tra}}}{\partial \theta_{\text{air}}} \Delta \theta_{\text{air}} < 0.08 \Delta \theta_{\text{air}} \quad (7)$$

したがって、 θ_{air} が $85^\circ \sim 90^\circ$ の間で変化するとき、 θ_{tra} の変化量は非常に小さくなる。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 θ_{tra} の変化が非常に小さいため同じように見える。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することで、透明物体の表面形状を推定する。

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。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、透明物体の辺縁の対応点のライトフィールドカメラからの距離を計算する。そして、計算した各対応点のライトフィールドカメラからの距離と位置の関係から透明物体の表面形状を推定する。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 ライトフィールドカメラ

図 4 に示すように、通常のカメラの場合では、ピント面にある点 A、ピント面より遠方にある点 B からの光線は、レンズで屈折し、撮像素子に到達し像を作り出す。このとき、点 A からの光線は撮像素子の一点に集光し、点 B からの光は撮像素子の異なる位置に到達する。これにより、点 A はピントが合い、点 B はボケた画像が得られる。通常のカメラでは、様々な方向からの光は撮像素子で加算され、一度加算された光は元の光線に分離することは不可能である。一方、図 5 に示すようなカメラアレイは、それぞれの光線が角度ごとに撮像素子の異なる位置に到達するため、元の光線を分離可能な形で記録することができる。この光線を計算機により処理することで任意の距離にピントを合わせた画像を再構成できる。ライトフィールドカメラの内部は、図 6 に示すように、メインレンズと撮像素子の間にマイクロレンズアレイが配置された構造になっている。このマイクロレンズアレイと撮像素子はカメラアレイと等価であるとみなせ、ライトフィールドカメラを用いることで多数のカメラアレイにより撮影したアレイ画像と等価の画像を得ることが可能となる。

4.3 カメラアレイと距離の関係

図 7 に示すように、同じ方向を向いている三つのカメラで任意の一点を見た場合において、上のカメラに注目して考える。カメラから取得する画像のピクセル幅を W とし、上のカメラの点 A が映る位置の心からのピクセル幅を X とし、カメラの画角を φ とする場合、それぞれの関係は以下のようになる。

$$\frac{X}{W} = \frac{d}{l \tan \frac{\varphi}{2}} \quad (8)$$

$$X = \frac{Wd}{2l \tan \frac{\varphi}{2}} \quad (9)$$

したがって、カメラから距離 l m にある点 A は上のカメラでは中心から X ピクセル左に映ることになる。

4.4 表面形状部分推定

縦横等間隔に配置された複数のカメラにより構成されるカメラアレイを考える。このカメラアレイで中心のカメラ

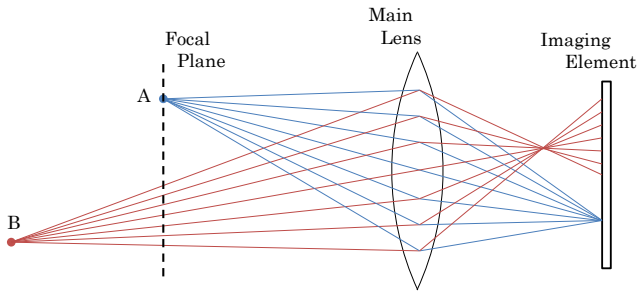


図 4 通常のカメラの光線

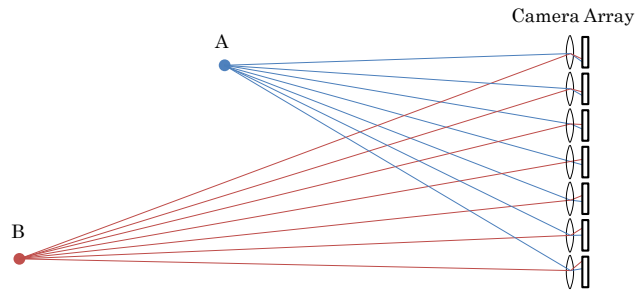


図 5 カメラアレイの光線

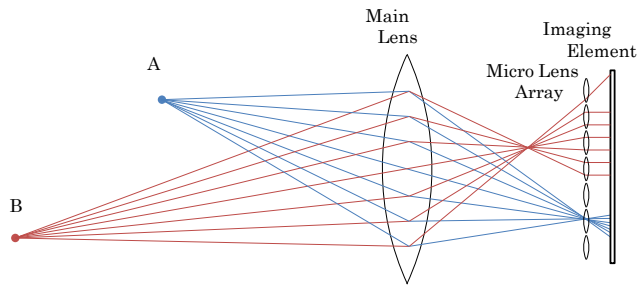


図 6 ライトフィールドカメラの構造

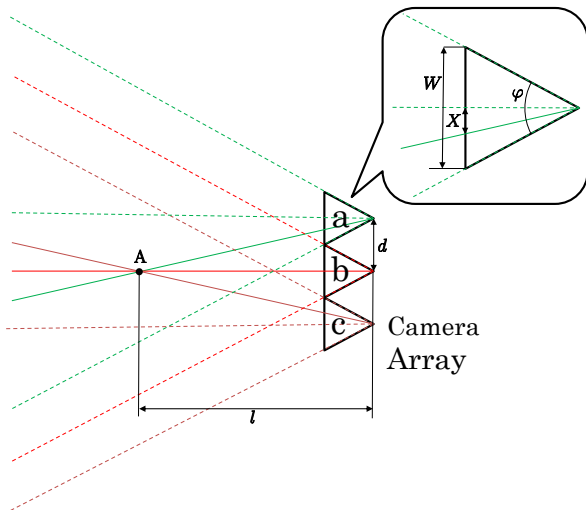


図 7 カメラと空間中の点の位置関係

の光軸上の点を見た時のアレイ画像を図 8 に示す。この点はカメラの位置に応じて中心からズレて写る。このズレは縦横の位置により同様にズレるので、ズレ量 s は式 (9) の X と同じであると見なすことができ、光軸の点の距離の関

係は式 (9) で表される。このズレで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。カメラの位置に応じたラベルを u と v で表し、カメラ (u, v) により取得される画像を $I^{(u,v)}(x, y)$ とし、カメラ (u, v) とズレ量 s に応じて取得画像 $I^{(u,v)}(x, y)$ をズレを戻す方向に平行移動した画像を $J^{(u,v)}(x, y, s)$ とし、カメラの総数を N_{uv} とするとき、画素 (x, y) での誤差関数を以下のように定義する。

$$E(x, y, s) = \sum_{x, y} \sum_{u, v} \left\{ J^{(u,v)}(x, y, s) - \frac{\sum_{u', v'} J^{(u', v')}(x, y, s)}{N_{uv}} \right\}^2 \quad (10)$$

$\sum_{x, y}$ は、画像の 1 画素ではなく、一定の領域に関して E を計算する事を表す。この E は、一点に集光したとき最小となる。

図 9 に透明物体を通過する光線を示す。図 9 は四つの異なる位置を見た場合におけるカメラアレイの光線を示している。図 9 (a) (d) は透明物体の辺縁で背景に集光した場合と透明物体の表面の辺縁に集光した場合を示しており、(b) (c) は透明物体の中央付近で透明物体の表面に集光した場合と透明物体を通過して背景に集光した場合を示している。(a) では多くの光線が途中で透明物体を通過し、通過した光線は他の場所に到達するため E は大きくなる。一方、(d) では辺縁に集光する光線のみ集光する。したがって、(d) の場合に E は小さくなる。また、(b) では集光されず、(c) では背景に集光するため E が小さくなる。したがって、以下のように誤差関数 E 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し、視差画像 I_{dis} を得られる。

$$I_{\text{dis}}(x, y) = \arg \min_s E(x, y, s) \quad (11)$$

この視差画像から以下のように距離画像を得られる。

$$I_{\text{len}}(x, y) = \frac{wd}{2I_{\text{dis}}(x, y) \tan \frac{\varphi}{2}} \quad (12)$$

5. 表面形状推定実験

提案手法により透明物体の辺縁の表面形状を推定でき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た結果を示す。

5.1 シミュレーション結果

図 10 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カメラから距離 80 mm の間に配置した。透明物体の

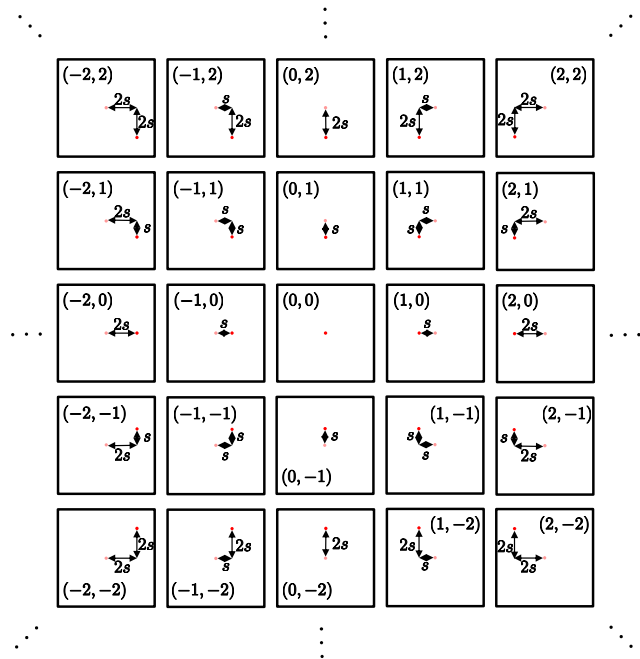


図 8 カメラアレイ画像

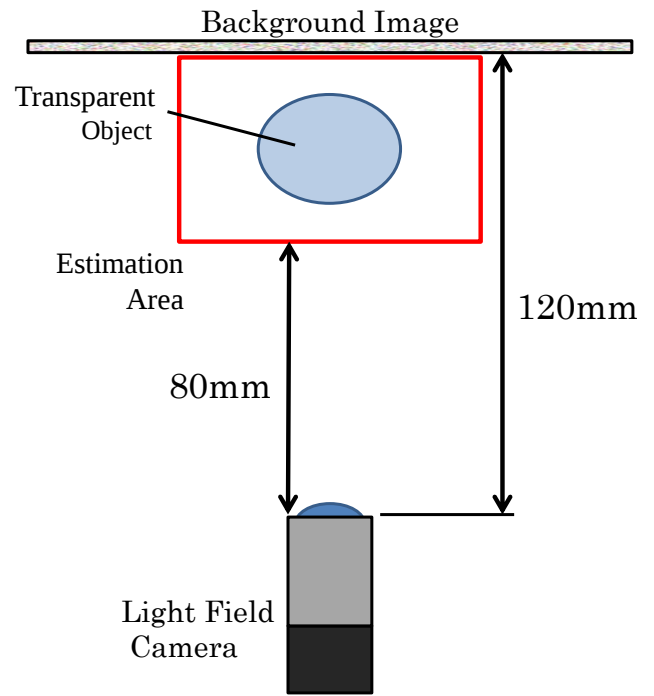


図 10 実験状況

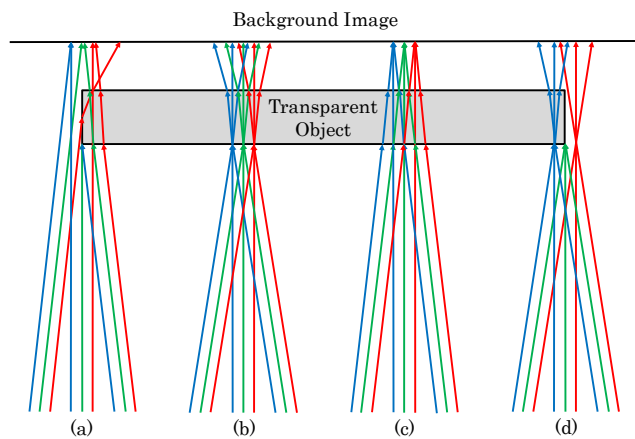


図 9 透明物体を通過する光線

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 を用いて作成した。作成した画像の画質は 600×600 画素とし、カメラの画角は 35° とした。カメラアレイは、縦横 10×10 個のカメラで構成され、カメラ間距離を 6.7 mm とした。また、実際のライトフィールドカメラにより得られるアレイ画像を想定して、すべてのカメラの光軸は距離 80 mm で集光する角度で配置した。

まず、単純な形状である球状の透明物体を撮影した場合のカメラアレイ画像をシミュレーションにより作成した。図 11 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 10 に示すように、距離 80 mm～120 mm の間とした。図 12 に、推定した距離画像を示す。つぎに、より複雑な形状である Stanford Bunny[11] 状の透明物体をライトフィー

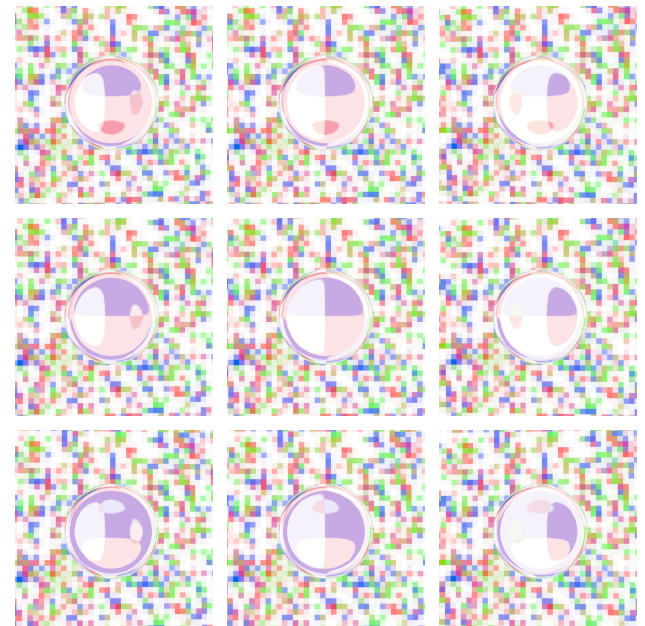


図 11 球状の透明物体のカメラアレイ画像の一部

ルドカメラにより撮影した。図 13 に、取得したカメラアレイ画像の一部を示す。図 14 に、推定した距離画像を示す。他にも、複雑な形状である Dragon[11] 状, Buddha[11] 状, Armadillo[11] 状, AsianDragon[11] 状, Lucy[11] 状の透明物体においても推定実験を行った。その結果を図 15～図 24 に示す。

5.2 考察

図 12 を見ると、球状の透明物体では、背景および透明物

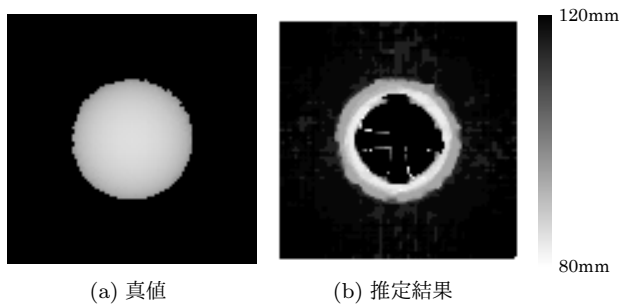


図 12 球状の透明物体の推定結果

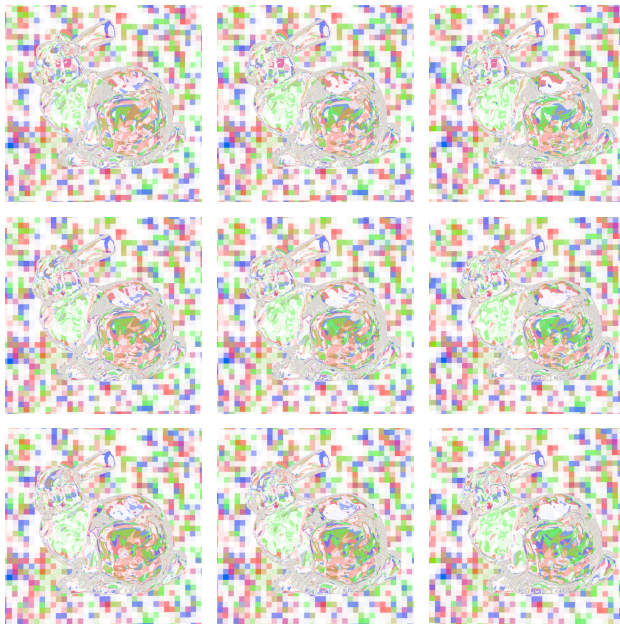


図 13 Bunny 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

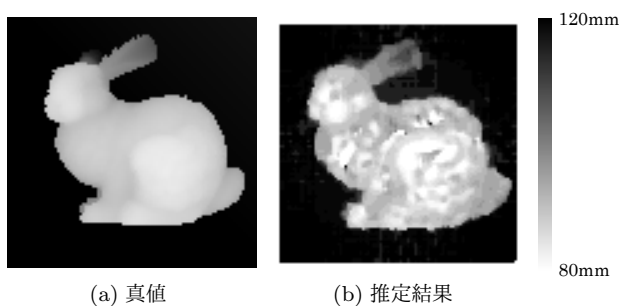


図 14 Bunny 状の透明物体の推定結果

体の辺縁では距離を推定できていることが確認できる。しかし、透明物体の中心付近では正しく推定できず、推定された距離は背景の距離と類似した値であった。つぎに図 14 を見ると、Bunny 状の透明物体では、背景および透明物体の辺縁だけでなく、多くの位置において距離を推定できていることが確認できる。これは、対象の物体表面に凹凸が多く、辺縁と同様に凹凸の変化する境界には集光でき、その周囲では集光できないため、凹凸の境界を推定できたと

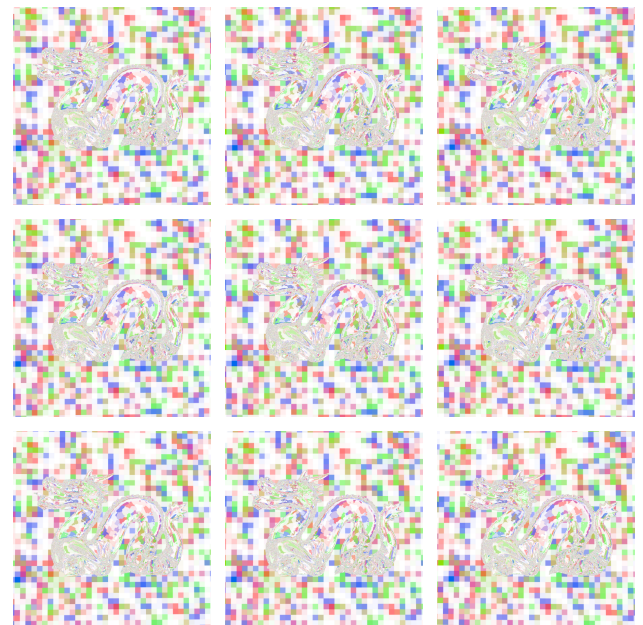


図 15 Dragon 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

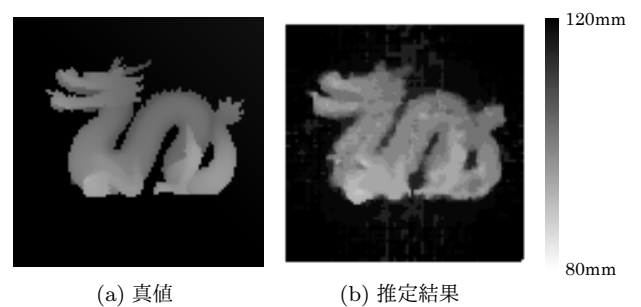


図 16 Dragon 状の透明物体の推定結果

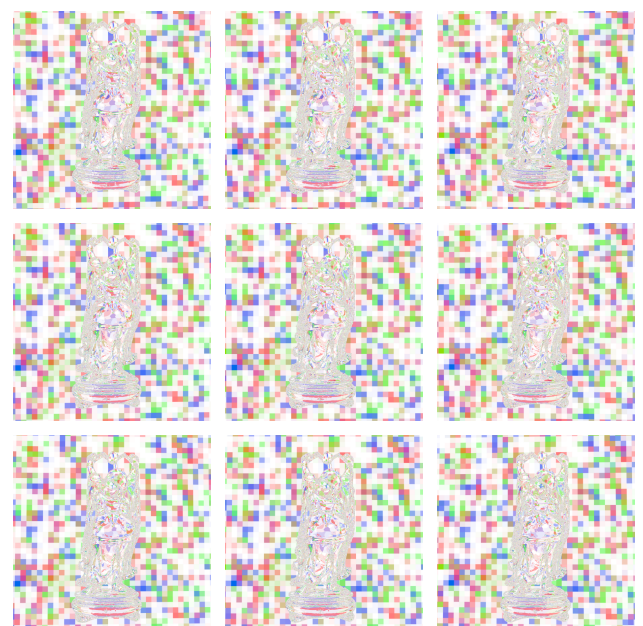


図 17 Buddha 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

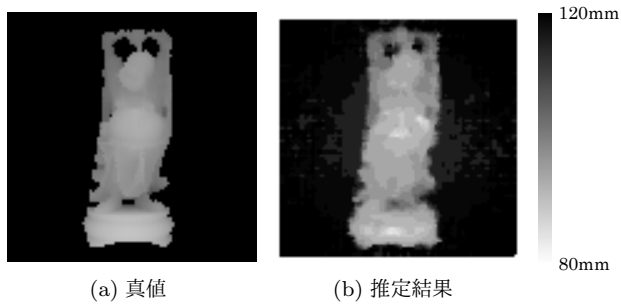


図 18 Buddha 状の透明物体の推定結果

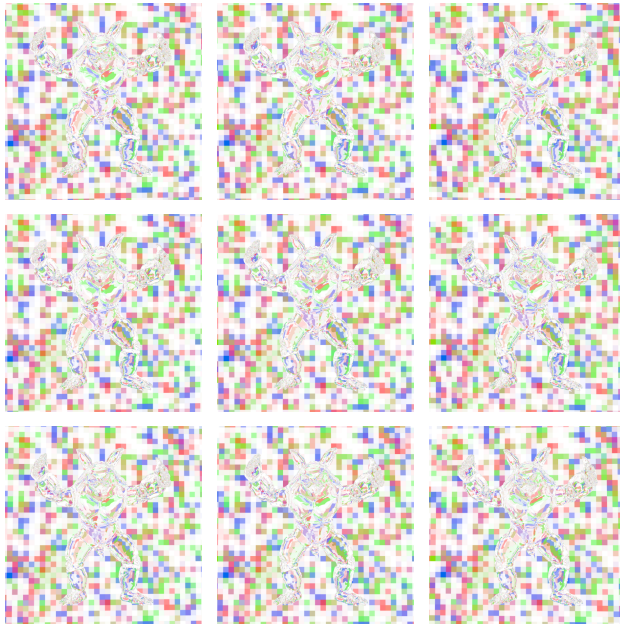


図 19 Armadillo 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

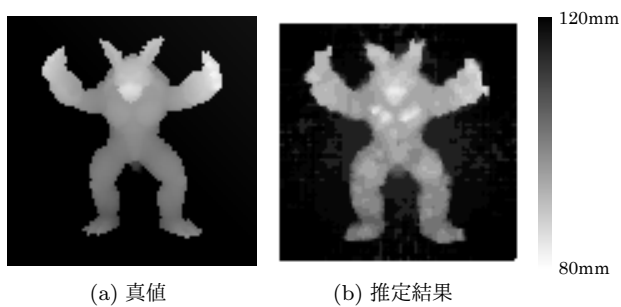


図 20 Armadillo 状の透明物体の推定結果

考えられる。また、図 16 を見ると、対象の物体表面に凹凸が多く、辺縁でない領域が狭いため、ほとんどの位置において距離を推定できていることが確認できる。同様に、図 18、図 20、図 22、図 24 もほとんどの位置において距離を推定できていることが確認できる。提案手法では、推定結果の方が実際の透明物体より面積が大きく推定されている。これは、提案手法では距離を計測する際に領域で計算していることが原因であると考えられる。これらの結果

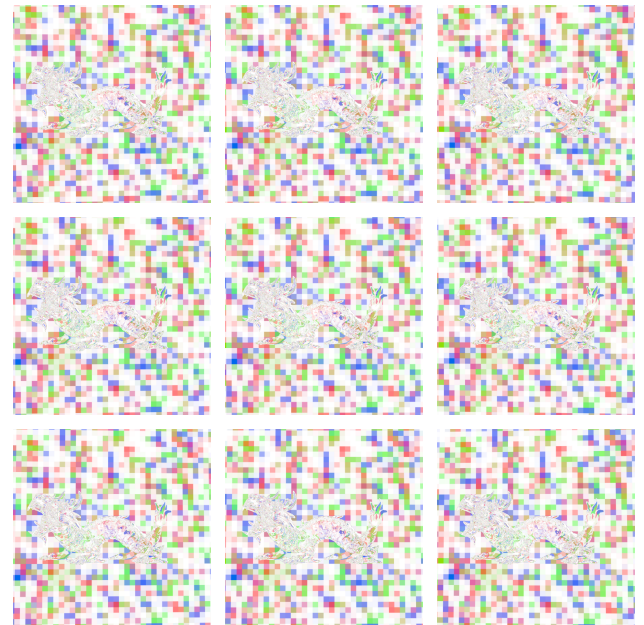


図 21 AsianDragon 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

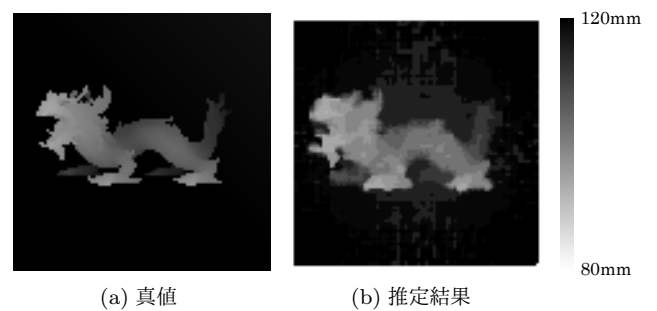


図 22 AsianDragon 状の透明物体の推定結果

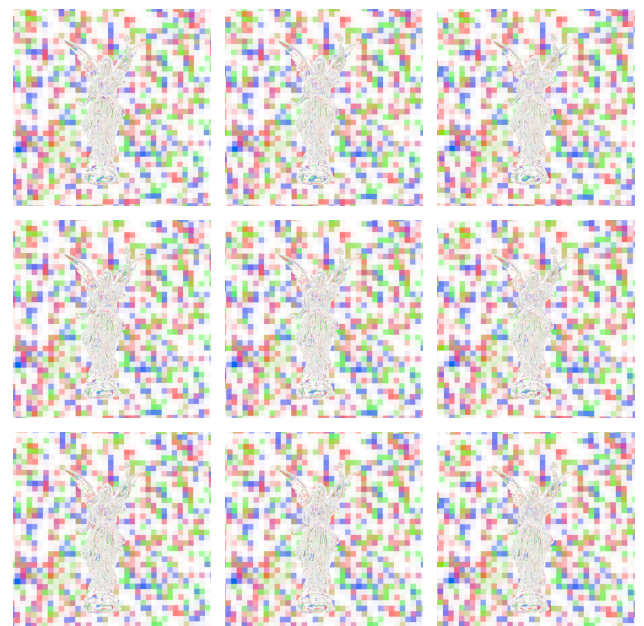


図 23 Lucy 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

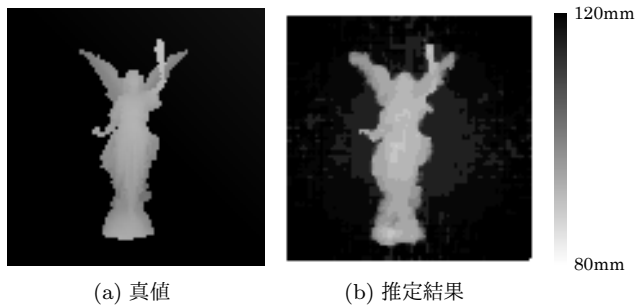


図 24 Lucy 状の透明物体の推定結果

から、透明物体の辺縁の表面形状を概ね推定できることが確認できた。また、辺縁が多く表面形状が複雑であるほどより正確に推定できることが分かった。

6. 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、ステレオ視を用いて透明物体の表面形状を推定する。本稿では、光学的部分恒常性を利用して透明物体の辺縁の表面形状を推定する手法を説明し、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た。その結果、透明物体の辺縁の表面形状を推定することができた。また、透明物体の表面形状がより複雑であるほど正確に形状が推定できることが分かった。今後は、透明物体の辺縁以外の場所の形状を推定手法を提案することで、透明物体全体の表面形状を推定することを目指す。

参考文献

- [1] M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, and H. Kashiwagi. Measurement of surface orientations of transparent objects by use of polarization in highlight. *JOSA A*, Vol. 16, No. 9, pp. 2286–2293, 1999.
- [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 under-

- standing of glossy objects. In *Proc. International Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 493–495, 1979.
- [7] 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. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), 2011.
 - [8] 宮崎大輔, 池内克史. 偏光と放物的曲線の解析による透明物体の表面形状計測. 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 44, pp. 86–93, 2003.
 - [9] 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.
 - [10] Richard P Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, chapter 26. Basic Books, 1963.
 - [11] The stanford 3d scanning repository. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/> (reference 2015-10-06).