

# 中空透明球体上の鏡面反射光を用いた近接点光源位置の推定

青砥 隆仁<sup>†</sup> 武富 貴史<sup>†</sup> 佐藤 智和<sup>†</sup> 向川 康博<sup>††</sup> 横矢 直和<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

<sup>††</sup> 大阪大学 産業科学研究所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ8-1

E-mail: †{takahito-a,takafumi-t,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp, ††mukaigaw@am.sanken.osaka-u.ac.jp

**あらまし** 近接光源位置の推定は、照度差ステレオ法による物体形状の計測において重要な課題である。本稿では、実環境の光源分布を計測する方法として、中空透明球体を用いた近接光源位置の推定手法を提案する。従来、近接光源位置の推定手法として、複数の参照物体から観測される反射光や単一の参照物体によって生じる影を用いる方法が提案されてきた。しかし、前者は参照物体間の位置関係を事前にキャリブレーションする必要があり、後者には推定すべきパラメータが多く、光源位置を安定に推定することが難しいという問題がある。本研究では、中空透明球体を用いることで、これらの問題を解決する。提案手法は、(1) 単一の参照物体のみによる推定を行うため参照物体間の幾何学的キャリブレーションが不要である、(2) 光源・カメラの光学中心・透明球の中心の3点で構成されるエピポーラ平面上に必ず反射光が存在するため、画像上で反射光と球中心が直線上に観測でき反射光の対応付けが容易である、(3) 画像上で反射光の再投影誤差を最小化することで光源位置を高精度かつ安定に推定できる、という特長がある。実験では、シミュレーション環境および実環境で光源位置の三次元復元を行い、精度評価を行う。

**キーワード** 近接光源位置推定, 中空透明球体, 再投影誤差最小化, 照度差ステレオ

## 1. はじめに

異なる照明条件下で撮影された画像群から物体形状を復元する照度差ステレオは、物体表面の詳細な法線を復元することが可能であり、デジタルアーカイブなどへの応用が期待されている。照度差ステレオでは、物体表面の明るさが光源方向と物体表面の法線方向に依存して変化することを利用しており、法線を復元するためには光源位置および強度を推定する必要がある。初期の照度差ステレオでは、無限遠点光源を仮定し、単一の鏡面球に写り込む反射光から光源方向を推定することで法線の復元を行っていた [1], [2]。しかし、光源が十分遠方でない場合には物体上の位置によって光の入射方向が異なることになり、無限遠点光源を仮定した手法を用いて精度良く法線を推定することは難しい。これに対して近年、近接光源を前提とした照度差ステレオ法に関する研究が盛んに行われている [3]~[5]。これら近接光源を用いた照度差ステレオでは、光源位置を推定することが特に重要となる。近接光源位置を推定する手法は、複数の参照物体を用いる手法と単一の参照物体を用いる手法に大別できる。

複数の参照物体を用いる手法 [6], [7] は、参照物体表面の鏡面反射光を検出し対応付けることで、三角測量の原理に基づいて光源位置を推定する。Powell ら [6] は、鏡面反射が強く観察される参照球を 2 個用い、2 つの参照球上の鏡面反射の対応付けを行うことで三角測量の原理に基づいて光源の位置を求める手法を提案している。この手法は、球が広範囲な法線分布を持つという性質を利用しているため、光源位置を計測可能な範囲が広いという

特徴がある。しかし、事前に参照物体間の位置関係を高精度にキャリブレーションする必要がある。また、この手法は、光源位置と光学中心から球面上の反射位置を求めることが困難であるという理由から、光源位置を推定する際に画像上で再投影誤差を最小化することが難しく、2 本の光路を最短で結ぶ線分の中点を光源位置とする方法 (中点法) が用いられている。

Shen ら [7] はマーカを取り付けた 2 枚の平面鏡を角度を変えて設置し、2 枚の平面鏡上の鏡面反射の対応付けを行い光源の位置を求める手法を提案している。この手法では参照物体間のキャリブレーションをマーカを用いてオンラインで行うため、事前に参照物体間のキャリブレーションを行う必要がない。また、球と比較して光線方向の分解能が高いため、球を用いた手法よりも位置推定精度が高いという特長がある反面、光源位置を計測可能な範囲が狭いという問題がある。これら複数の参照物体を用いる手法には、複数光源下において、対応する反射光を決定することが難しいという共通の問題がある。

一方、単一の参照物体を用いる推定手法 [8]~[12] は、単一の参照物体から得られる情報と幾何学的な形状、物体の表面反射特性などの事前知識を用いて光源位置を推定する。Debevec ら [8] は、light probe と呼ばれる鏡面球をシーン内に設置し、鏡面球上の反射光強度を元に環境内の光源分布を決定している。ただし、このままでは球と光源までの距離が決まらないため、この手法では予め手入力を与えられている部屋の形状を利用し光源位置を推定している。この方法は容易に光源位置を推定することができるが、空間の幾何形状を取得するためには多くの

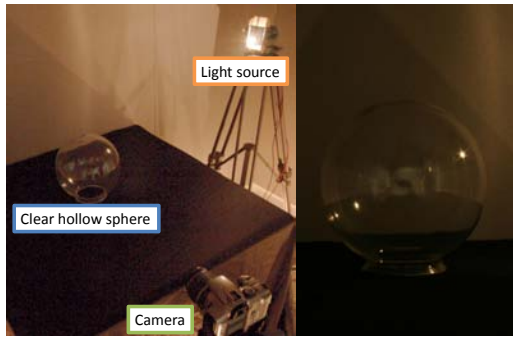


図 1 中空透明球体 (左:実験環境の外観図 右:観測画像)

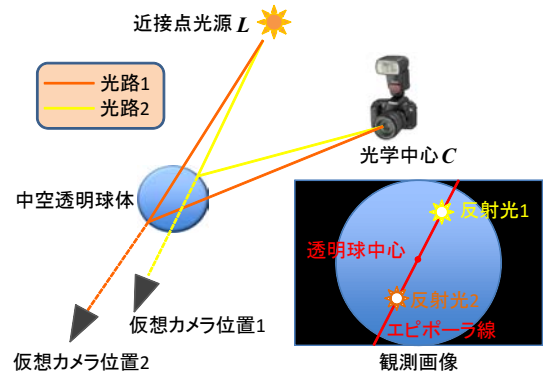


図 2 中空透明球を用いた光源位置推定

人的コストが必要であるという問題がある。Takai ら [9] は、拡散球上の等輝度線の分布から推定された光源方向を元に近接光源位置を求める手法を提案している。この手法には、近接光源位置の推定に必要な、球面上で光が当たる領域と光の当たらない領域の境界線と等輝度線を検出することで、容易に光源位置が推定できるという特徴がある。しかし、複数光源下において、これらの境界線と等輝度線を安定に見つけることが難しいという問題がある。また、Takai ら [11] は中空の立方体の内壁に落とされるセルフシャドウを利用した光源推定手法を提案している。この手法は、空間中のいかなる位置に近接点光源が存在しても中空の立方体内にセルフシャドウが生じることを利用し、中空立方体上で観測される輝度値と既知の中空立方体の反射特性の関係から光源位置と強度を推定する。この手法では、光源位置の推定が非線形最小化問題となり、多くの局所解が生じることから光源位置を安定に推定することが難しいという問題がある。

これに対して、本研究では以下の条件を満たす新たな近接光源位置推定手法を提案する。

- 複数参照物体間の幾何学的キャリブレーションが不要
- 対応する反射光の決定が容易
- 再投影誤差を最小化することにより光源位置を精度良く推定可能

具体的には、図 1 に示すような単一の中空透明球体を用いることにより、球面の外部で反射する鏡面反射光と、球面外部を通過した光が球面内部で反射し観測される鏡面反射光の 2 種類の鏡面反射光を観測することで、三角測量の原理に基づいて光源位置を推定する。本手法では、複数の参照物体を用いる手法と異なり、対応する光源の反射光の組が、必ず画像上で球中心を通るエピポーラ線上に存在するため、複数光源下においても比較的容易に対応する反射光を決定できるという特徴を持つ。

## 2. 中空透明球体を用いた近接光源位置の推定

本節では、まず本研究で用いる中空透明球体の特徴について述べる。次に、提案手法の概要を述べた後に、透明球の三次元位置の推定、画像上における反射光位置の検出、画像上における反射光の再投影誤差の最小化法、反射

光を用いた光源位置推定手法、について順に述べる。

### 2.1 中空透明球体の特徴

本研究では、図 1 に示したような球体内部が中空の透明球体上の反射光を用いて近接光源の位置を推定する。中空透明球体を用いた場合、図 2 に示すように、光源から出た光は球面外部で反射した球面外部反射光 (光路 1) と、表面を透過し球面内部で反射した球面内部反射光 (光路 2) として画像上で観測される。これらの 2 種類の反射光を観測することは、図中に示すように 2 台の仮想カメラを用いて光源を直接観測することと等価である。このため、球の半径とカメラの内部パラメータが既知である場合、観測された反射光の画像上の位置より三角測量の原理により近接光源の三次元位置を推定することができる。また、対応する反射光は、光源位置  $L$ 、カメラ光学中心  $C$ 、中空透明球体中心  $S_c$  により規定されるエピポーラ平面上に存在し、この平面は画像上で直線として観測されるため、光源が複数存在する場合においても、対応する 2 種類の反射光の探索範囲がエピポーラ線上に限定できるという特長を持つ。

### 2.2 近接光源位置推定手法の概要

提案手法は、前節で述べた中空透明球体を用い、単一の画像から観測される中空透明球体上の鏡面反射光をもとに近接光源の位置を推定する。既知の情報は中空透明球体の形状のみであり、カメラは事前に校正済みのものを使用する。具体的にはまず、透明球の画像上での大きさ、位置を利用して、光学中心からの透明球の相対的な位置を算出する。次に、対応する反射光が画像上で直線として観測されるという特長を用い、対応する反射光を決定をする。ここで、画像上で観測される鏡面反射光は反射光の検出誤差や中空透明球体の製造上の法線方向のずれなど影響により厳密には画像上で直線として観測されないため、対応する反射光と透明球中心が画像上で直線となるように再投影誤差を最小化し、エピポーラ線を決定する。最後に推定された透明球の位置情報と反射光の位置から三角測量の原理により近接光源の三次元位置を推定する。なお、本論文では画像上で観測される鏡面反射光は 1 次

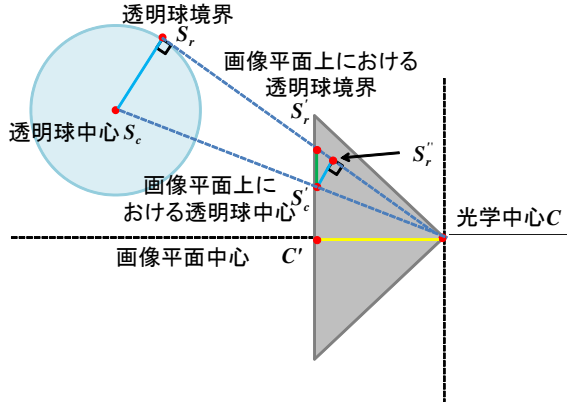


図3 光軸上に透明球中心が存在しない場合の幾何学的な関係

反射のみとし、透明球の厚さが屈折の影響を無視できるほど小さいと仮定する。

### 2.3 透明球の三次元位置の推定

本手法では、光学中心と透明球中心の相対的な位置関係を用い、画像上で観測される情報と既知の情報である透明球の半径  $r$ 、カメラパラメータから透明球の三次元位置を推定する。図3に示すように、光学中心  $C$ 、透明球中心  $S_c$ 、透明球境界  $S_r$ 、で構成される三角形  $CS_cS_r$  と光学中心  $C$ 、画像平面上における透明球中心  $S'_c, S'_r$  から光学中心を通る透明球接線上に下した垂線の足である点  $S''_r$ 、で構成される三角形  $CS'_cS''_r$  は相似の関係にある。また、画像平面上における透明球境界  $S'_r$ 、光学中心  $C$ 、画像平面中心  $C'$  で構成される三角形  $S'_rCC'$  と、画像平面上における透明球境界  $S'_r$ 、画像平面上における透明球中心  $S'_c$ 、点  $S''_r$  で構成される三角形  $S'_rS'_cS''_r$  も相似の関係にある。従って、 $\|S_c - C\|$  は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \|S_c - C\| &= \frac{\|S'_c - C\| \|S_c - S_r\|}{\|S'_c - S''_r\|} \\ &= \frac{\|S'_c - C\| \|S_c - S_r\| \|S'_r - C\|}{\|S'_c - S'_r\| \|C - C'\|} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、画像平面上での球中心  $S'_c$  と画像中心  $C'$  の距離を  $r_q = \|S'_c - C'\|$  とすると、式(1)は焦点距離  $f$ 、透明球半径  $r$ 、画像平面上における透明球境界線から画像平面中心までの距離  $r_c$  を用いることで以下のように表される。

$$\|S_c - C\| = \frac{rf\sqrt{f^2 + (r_q - r_c)^2}}{r_c\sqrt{r_q^2 + f^2}} \quad (2)$$

これを用いる事で、透明球中心  $S_c$  は以下のように算出できる。

$$S_c = \frac{rf\sqrt{f^2 + (r_q - r_c)^2}}{r_c\sqrt{r_q^2 + f^2}} \frac{(S'_c - C)}{\sqrt{f^2 + (r_q - r_c)^2}} + C \quad (3)$$

### 2.4 画像上における反射光位置の検出と対応する反射光の組の決定

鏡面反射には、入射角と等しい反射角となる正反射方向に光が強く観測される性質がある。そのため、鏡のような完全鏡面反射特性を持つ物体における鏡面反射の放射強度は大きく露出オーバーを起こし、観測された鏡面反射光は白とびを起こす。また、前節までに述べたように、中空透明球体上で起こる鏡面反射光は、画像上で対応する反射光と透明球中心を通る直線上（エビポーラ線）に観測される。

このような性質を踏まえ、本手法では以下の手順で画像上における反射光位置の検出と対応する反射光の組の決定する。

- (1) 画像中の透明球領域内において白とびを起こしている領域を二値化して抽出する
- (2) 二値化された領域に対しラベリングを行い、その重心を反射光位置とする
- (3) 検出された反射光ごとに中空透明球体中心とその反射光を結ぶ直線との距離が最も近い反射光を1点選択する
- (4) (3)で、相互に選択された反射光の組を対応する反射光とする

ただし、エビポーラ平面上に複数の光源が存在する場合、すべての反射光が画像上で同一エビポーラ線上に存在するため対応する反射光の組を一意的に決定できない。

### 2.5 再投影誤差の最小化

エビポーラ線上において対応する反射光が決定すれば、2本の光路が交わる点が光源位置となるが、実際には2本の光路は、画像上での反射光の検出誤差や中空透明球体の製造上の法線方向のずれなどに起因して1点で交わらない。このような問題は、ステレオ視の分野においても存在し、この場合には画像上の再投影誤差（対応点の検出座標と三次元座標を画像上に投影した座標の間の2乗距離）が最小になるように対応点の三次元位置を定める方法が最善とされている。しかし、本研究のように球面上の反射光を扱う場合において、三次元位置が既知の光源に対する球面上の反射位置を代数的に求めることが困難であることが知られており [13]、三次元位置をパラメータとする一般的な再投影誤差最小化手法をそのまま利用することが難しい。このため、多くの従来手法では2本の光路を最短で結ぶ線分の midpoint を光源位置とする方法（中点法）が用いられてきた。本研究では、対応する反射光と球中心が理想的には画像上でエビポーラ線上に観測されるという特徴を利用することで、再投影誤差の最小化を実現する。

ここでは簡単のために球中心が光軸上に存在する場合を考える。ただし、球中心が光軸上に存在しない場合であったとしても光学中心と球中心を結ぶ直線に直交する

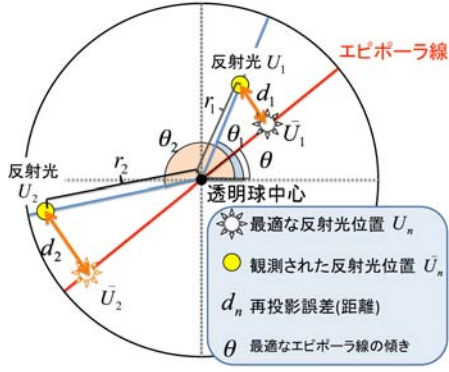


図 4 再投影誤差最小化

仮定の画像平面に射影することで条件を満たすことができるため一般性を失わない. 図 4 に示すように, 画像上の横軸に対して,  $\theta$  度傾いたエピポーラ線を考える. ここで, 画像上における 2 つの反射光観測位置をそれぞれ  $U_1, U_2$ , 推定される近接光源位置の画像上への再投影位置が  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  であるとする. このとき, 再投影誤差  $E$  は以下のように定義できる.

$$E = d_1^2 + d_2^2, d_1 = \|U_1 - \bar{U}_1\|, d_2 = \|U_2 - \bar{U}_2\| \quad (4)$$

ここで, エピポーラ線の傾き  $\theta$  がどのような値であっても,  $E$  を最小化する  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  の位置は,  $U_1, U_2$  からエピポーラ線に下ろした垂線の足となり, このとき,  $d_1, d_2$  は以下のように求まる.

$$\begin{cases} d_1 = |r_1 \sin(\theta - \theta_1)| \\ d_2 = |r_2 \sin(\theta - \theta_2)| \end{cases} \quad (5)$$

ただし,  $r_1$  は透明球中心から反射光  $U_1$  までの距離,  $r_2$  は透明球中心から反射光  $U_2$  までの距離である. この式を式 (4) に代入すれば,  $E$  は  $\theta$  の関数として以下のように表せる.

$$E(\theta) = (r_1 \sin(\theta - \theta_1))^2 + (r_2 \sin(\theta - \theta_2))^2 \quad (6)$$

ここで,  $E(\theta)$  を最小化する  $\theta$  を求めれば  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  の位置が定まる.  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  はエピポーラ線上に存在するため, これらの反射光は空間中で必ず交わる. 本手法では, この交点を光源の三次元位置とする.

## 2.6 反射光を用いた光源位置の推定

カメラの内部パラメータと空間中に設置した中空透明球体の半径を既知とし, 画像上で観測される反射光の位置より光源の三次元位置をカメラ座標系で推定する. 図 5 に示すように,  $i$  番目の光源  $L_{(i)}$  に対応する球体上の反射光  $n(n=1,2)$  の三次元位置  $P_{(i,n)}$  は, 光源  $L_{(i)}$ , カメラ光学中心  $C$ , 中空透明球体中心  $S_c$ , で規定されるエピポーラ平面上に存在する. ここで, 光源位置  $L_{(i)}$  は以下のように表すことができる.

$$L_{(i)} = P_{(i,n)} + s_{(i,n)}l_{(i,n)} \quad (n=1,2) \quad (7)$$

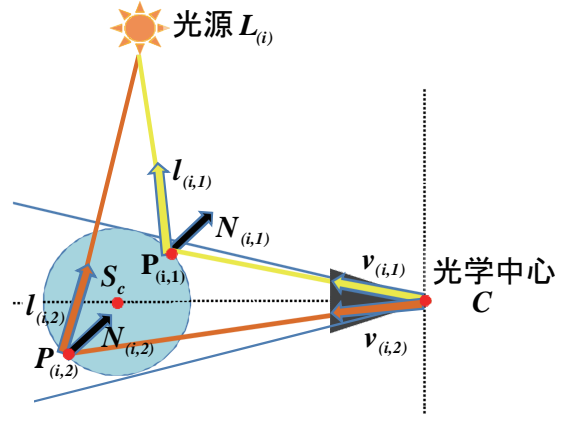


図 5 光源位置が透明球を含む視体積外に存在する場合のエピポーラ平面断面図

ただし,  $s_{(i,n)}$  は反射位置  $P_{(i,n)}$  から光源位置  $L_{(i)}$  までの距離,  $l_{(i,n)}$  は反射位置  $P_{(i,n)}$  から見た光源方向を表す単位方向ベクトルである. 画像上の反射光観測位置  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  を入力とし, 反射位置  $P_{(i,n)}$ , 光源方向ベクトル  $l_{(i,n)}$ , 距離  $d_{(i,n)}$  を算出することで, 光源位置  $L_{(i)}$  を推定することができる. 以下では反射位置  $P_{(i,n)}$ , 光源方向ベクトル  $l_{(i,n)}$ , 光源位置  $L_{(i)}$  それぞれの算出方法について順に述べる.

### 2.6.1 透明球上の反射位置の推定

球面上での反射位置  $P_{(i,n)}$  は, 光学中心  $C$  と画像上の反射位置  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  より定まる反射方向を表す単位方向ベクトル  $\bar{v}_{(i,n)}$  を用いて, 以下のように表わされる.

$$P_{(i,n)} = t_{(i,n)}\bar{v}_{(i,n)} \quad (8)$$

ここで,  $t_{(i,n)}$  は光学中心から反射位置までの距離を表す. 一方,  $P_{(i,n)}$  は  $S_c$  を中心とする半径  $r$  の透明球球面上に存在するため, 以下の式が成り立つ.

$$\|S_c - P_{(i,n)}\|^2 = r^2 \quad (9)$$

式 (9) に式 (8) を代入することで,

$$t_{(i,n)}^2 \bar{v}_{(i,n)}^2 - 2t_{(i,n)} S_c \cdot \bar{v}_{(i,n)} + S_c^2 = r^2 \quad (10)$$

が得られる. 従って  $t_{(i,n)}$  は以下のように求まる.

$$t_{(i,n)} = S_c \cdot \bar{v}_{(i,n)} \pm \sqrt{D_{(i,n)}} \quad (11)$$

$$D_{(i,n)} = (S_c \cdot \bar{v}_{(i,n)})^2 - S_c^2 + r^2 \quad (12)$$

ここで,  $D_{(i,n)} > 0$  であれば光線  $\bar{v}_{(i,n)}$  は球と 2 点で交わる.

### 2.6.2 光源方向ベクトルの推定

球面上の反射位置  $P_{(i,n)}$  でおきる反射は鏡面反射であるため, 光の入射角と反射角が等しい. 従って,  $P_{(i,n)}$  における単位光源方向ベクトル  $l_{(i,n)}$  は以下のように算出できる.

$$l_{(i,n)} = 2(N_{(i,n)} \cdot v_{(i,n)}) \cdot N_{(i,n)} + v_{(i,n)} \quad (13)$$

ただし,  $N_{(i,n)}$  は  $P_{(i,n)}$  における球面の単位法線ベクトルである.

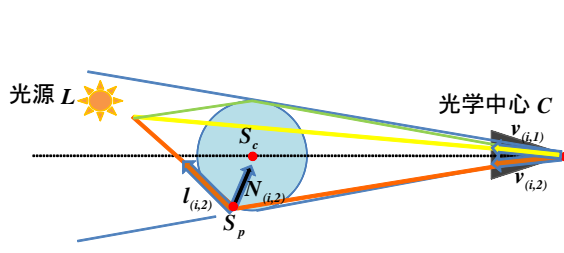


図 6 光源位置が透明球を含む視体内に存在する場合のエピポーラ平面断面図

### 2.6.3 光源位置の推定

式 (8), (13) より  $\mathbf{P}_{(i,n)}$ ,  $\mathbf{l}_{(i,n)}$  が求まれば, これを式 (7) に代入して  $\mathbf{L}_{(i)}$  についての連立方程式を解くことにより距離  $d_{(i,n)}$  が求まる. ただし, 1つの  $\mathbf{v}_{(i,n)}$  に対して2つの反射位置  $\mathbf{P}_{(i,n)}$  が求まるため, 画像上で鏡面反射が2点観測される場合には,  $\mathbf{P}_{(i,n)}$  の組み合わせは4通り存在する. 本研究では, 以下の制約を用いることで, 偽の  $\mathbf{P}_{(i,n)}$  の組を排除する.

- (1)  $s_{(i,n)} \geq 0$ : 反射位置から光源位置までの距離  $d_{(i,n)}$  は必ず正の値である.
- (2)  $\|\mathbf{L}_{(i)} - \mathbf{S}_c\| \geq r$ : 光源は中空透明球体内に存在しない.

以上より, 1対の  $\bar{\mathbf{v}}_{(i,n)}$  から1対の反射点  $\mathbf{P}_{(i,n)}$  と距離  $d_{(i,n)}$  が求まる. これを式 (1) に代入することにより光源位置  $\mathbf{L}_{(i)}$  が求まる.

ただし, 図 6 に示すように, 光源位置が透明球を含む視体内に存在し, かつ球より遠方に存在する場合, 直接光1点と反射光2点の3点のハイライトが画像上で観測される. 直接光は反射光2点の間に必ず存在するため, 直接光と反射光の組み合わせが2つ考えられる. この場合には, 光源位置  $\mathbf{L}_{(i)}$  は, 直接光の観測と鏡面反射光の観測から得られる以下の連立方程式から算出できる.

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{(i)} = t_{(i,1)} \bar{\mathbf{v}}_{(i,1)} \\ \mathbf{L}_{(i)} = s_{(i,2)} \mathbf{l}_{(i,2)} + \mathbf{P}_{(i,2)} \end{cases} \quad (14)$$

光源からの直接観測光が2つの光路の何れであるか未知の場合には,  $\bar{\mathbf{v}}_{(i,n)}$ ,  $\mathbf{P}_{(i,n)}$  の組み合わせが4通り存在するが, 条件 (1)(2) を用いることにより偽の  $\mathbf{v}_{(i,n)}$ ,  $\mathbf{P}_{(i,n)}$  の組み合わせを排除し, 光源位置  $\mathbf{L}_{(i)}$  を推定する.

## 3. 実験

提案手法の有効性を示すために, CG シミュレーション環境において光源位置の推定を行い, 真値との比較を行うことで光源位置の推定精度を検証した. また, 実画像を用いて実シーンでの光源位置推定を行った.

### 3.1 シミュレーション環境における光源位置推定精度の評価

本節では光源位置の変化が光源位置の推定精度に与える影響を検証する. 本実験では図 7 に示すように, カメ

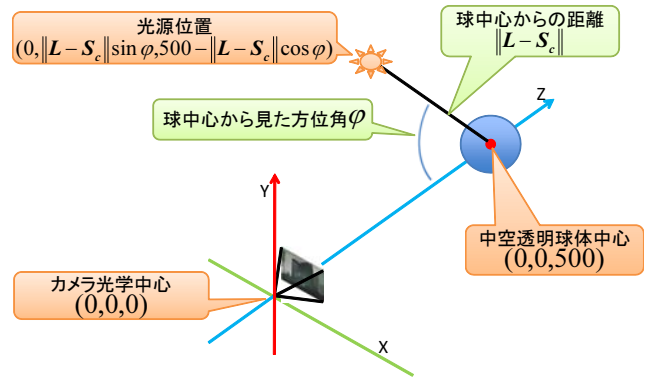


図 7 シミュレーション環境におけるカメラと中空透明球位置をシミュレーション空間内の点  $(0, 0, 0)$  に設置し, カメラから 500mm 離れた地点  $(0, 0, 500)$  に半径 100mm, 厚さ 0mm の厚みによる屈折の影響を受けない理想的な中空透明球を固定した. このような設定で, 光源の位置を  $x = 0$  の  $yz$  平面上で変化させながらカメラにより撮像される画像を POV-Ray [14] を用いてレンダリングし, その画像を元に再投影誤差を最小化する方法と従来の方法である中点法を用いた方法によって光源位置を推定・評価した. なお, 本シミュレーションでは, 水平画角約  $60^\circ$ , 垂直画角約  $45^\circ$  のカメラを想定し, カメラの解像度を  $1024 \times 768$  ピクセル, カメラのレンズ歪みはないものとし, 以下の内部パラメータ行列を用いた.

$$K = \begin{bmatrix} 870 & 0 & 511.5 \\ 0 & 870 & 383.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

シミュレーションに用いた光源位置は, 光源と透明球中心の間の距離  $D_{(L-S_c)}$  を 100mm ~ 800mm の範囲で 10mm 間隔, 球中心から見た光源の方位角  $\phi$  を  $0 \sim 180^\circ$  の範囲で  $2^\circ$  間隔で変化させたものを用いた. これらの光源位置に対して画像をレンダリングし, 画像上の反射点検出位置に2種類の異なる標準偏差  $\sigma = (0, 1.0)$  ピクセルのノイズを付加したものを用いて光源位置の推定精度を評価した. 本実験では, 真の光源位置が透明球を含む視体内に存在する場合には, 直接観測光を用いる式 (14) を用い, それ以外の場合には式 (7) を用いて光源位置を推定した.

再投影誤差を最小化する提案手法と中点法を用いる手法による光源位置推定誤差の分布および二つの手法の誤差比を図 8 に示す. 同図は, シミュレーションにおいて設定した真の光源位置について, 提案手法による推定誤差を 1 万回の試行により得られた結果の中間値である. 図 8 より, カメラの光学中心 (図中  $(0, 0, 0)$ ) を通る透明球の接線周辺および光軸周りを除く多くの領域で光源位置を安定に推定可能であることが確認できる. カメラの光学中心を通る透明球の接線付近に光源がある場合には, 画像上において透明球と背景領域の境界線近くに反射光が

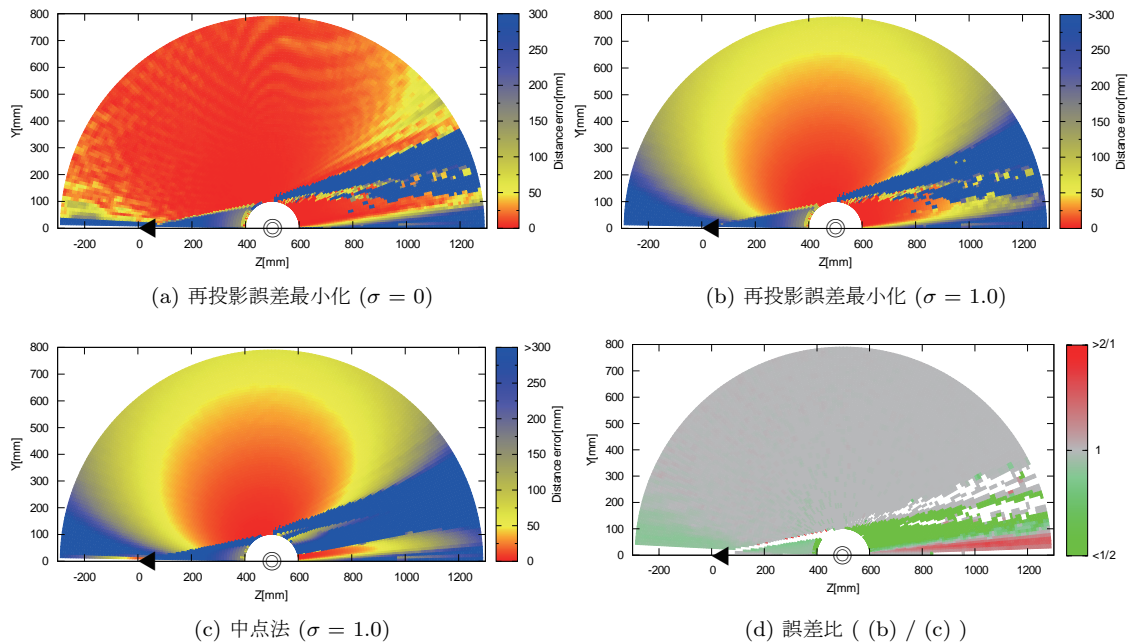


図 8 光源位置推定誤差の分布. 図中三角はカメラ位置, 二重丸は透明球中心を表している.

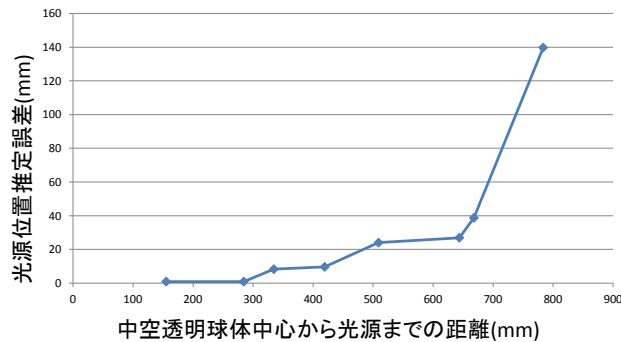


図 9 実環境における光源位置推定誤差

観測される. この時, 反射光位置の微小変化で光線の反射方向が大きく変化するため, 光源位置の推定精度が悪化する. 光軸周りに光源が存在する場合には, 二つの鏡面反射光が画像上で接近し, 視差が小さくなるため手法原理上正しく光源位置を推定できない. また, 図 8(a)(b)より検出誤差を加えた際, 推定精度が悪化する領域とあまり変化しない領域が存在することがわかる. 推定精度が悪化する領域は, 上記の光源位置を推定することが難しい領域周辺であり, 一方, 推定精度があまり変化しない領域に光源が存在する場合には, 画像上において反射光もしくは直接光が透明球境界線から離れた位置に観測され, かつ観測される二つの反射光もしくは反射光と直接光の距離も十分離れていた. 図 8(d) は, (b)/(c)より算出した再投影誤差を最小化する方法と中点法の誤差比である. (d)より, 再投影誤差を最小化することで, 大半の領域でより精度の高い光源位置の推定が実現できることがわかる (図 8(d) 緑色領域).

### 3.2 実環境における光源位置推定精度の評価

本実験では, 実環境における単一光源下での光源位置推定精度を評価する. ここでは, デジタルカメラ (Canon EOS kiss Digital, 解像度  $1024 \times 768$ ) を用いて, カメラから約 620mm の距離に設置した半径 100mm, 厚さ 7mm の固定された中空透明を撮影した静止画像を用い, 方位角  $70^\circ$  方向の 8 箇所の異なる位置に設置されたハロゲンライトの位置を推定した. ここでは定量評価を行うために, 光源の位置をあらかじめトータルステーションを用いて計測し, これを真値とした. また, カメラの位置姿勢はトータルステーションを用いて計測した点を用いて PnP 問題を解くことで推定した. また, カメラは事前にキャリブレーション済みであり, 球の検出には Hough 変換を用いた. 図 9 に球中心から光源までの距離と, 真値との比較による光源位置推定誤差の関係を示す.

同図より, 中空透明球体中心より約 650mm 離れた点までは比較的高精度に光源位置を推定できていることが確認できる. このような場合には, 画像上において二つの反射光が透明球境界線から離れた位置に観測され, かつ画

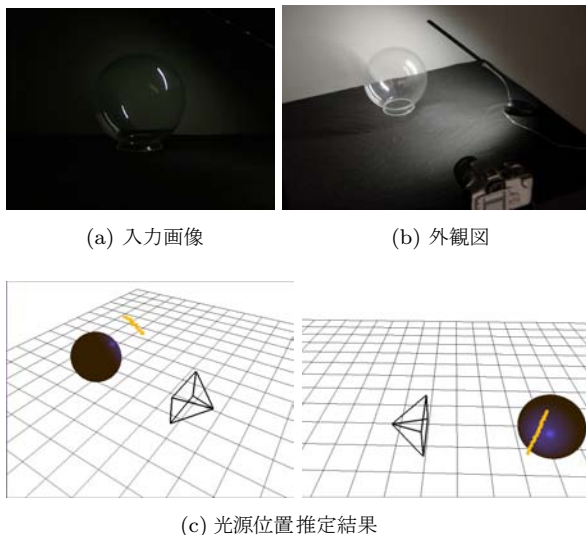


図 10 実環境における線光源の光源位置推定

像上で十分離れているという光源位置を安定に推定可能な条件を満たしている。一方、中空透明球体中心から光源までの距離が約 650mm 離れた場合には光源位置推定精度が急激に悪化している。これはシミュレーションで見られた傾向と同様に、2 種類の光源方向ベクトルが平行に近くなり、三角測量による測位が不安定となるためである。

### 3.3 実環境における線光源の光源位置推定

提案手法は、エピポーラ拘束を用いることで複数光源下においても対応する反射光を容易に決定することができる。ここでは、線光源に対する三次元復元によって、提案手法の優位性を示す。本実験では、デジタルカメラ (Canon EOS kiss Digital) を用いて、カメラから約 500mm の距離に設置した半径 100mm、厚さ 7mm の固定された中空透明球体を撮影し、1 枚の静止画像 (解像度 1024 × 768) を用いて、線光源である LED 電気スタンドの光源位置を推定した。本実験では球中心を通るエピポーラ線を 2 度刻みに回転させ、エピポーラ線上に観測されるハイライト領域の重心を反射光位置とすることで光源の位置を推定した。図 10 に (a) 入力画像、(b) 外観図、(c) 光源位置を推定した結果を示す。図 10(c) より線光源が直線上に三次元点群として復元されており、これらが線状に分布していることが確認できる。

## 4. 推定された近接光源位置情報を用いた照度差ステレオ法による形状復元

提案手法の有効性を示すために、提案手法によって推定された近接光源位置情報を入力とし、Iwahori らの手法 [3] による近接光源を用いた照度差ステレオ法を用いてシミュレーション環境および実環境内で三次元形状の復元を行った。

## 4.1 シミュレーション環境における形状復元結果

形状復元の理想的な対象物体として真球を用いてシミュレーション実験を行った。本実験では、カメラ (解像度 1024 × 768) をシミュレーション空間内の点 (0,0,0) に設置し、カメラから 500mm 離れた地点 (0,0,500) に半径 100mm、厚さ 0mm の厚みによる屈折の影響を受けない理想的な中空透明球体を設置した。このような設定で光源を安定に推定可能な方位角 30 度 ~ 80 度の範囲内の 24 箇所の異なる位置に光源を設置し、カメラにより取得された画像から提案手法によって光源位置を推定した。次に中空透明球体を取り除き、中空透明球体を設置していた地点 (0,0,500) に半径 50mm の完全拡散反射球を設置し、それぞれの光源下における画像を再度 POV-Ray [14] を用いてレンダリングしたものを入力画像とした。

図 11 に入力画像、推定された光源位置情報を用いて復元された三次元点群、真の光源位置情報を用いて復元された三次元点群、推定した光源を用いた場合と真値を用いた場合の距離画像および法線方向画像の差分の絶対値を 8 倍した画像を示す。本実験より、推定された近接光源位置を用いることで、シミュレーション環境下において、観測される輝度値が広く分布する領域では物体表面の法線方向と三次元形状を安定に推定することが可能であることを確認した。

## 4.2 実環境における形状復元結果

本実験では、線形なレスポンス関数を持つデジタルカメラ (Canon EOS kiss Digital, 解像度 1024 × 768) を用い、17 箇所の異なる位置に設置したハログゲンライトの位置を提案手法によって推定した。次にそれぞれの光源下で石膏像を撮影し、17 枚の入力画像とそれに対応する光源位置情報から三次元形状を復元した。図 12 に入力画像、推定された法線マップおよび推定された三次元点群を示す。

実験の結果、法線はおおむね正しく推定されたものの対象物体の形状が滑らかにならず推定精度が低い。これは実環境において近接光源を用いた照度差ステレオ法を行う場合に、相互反射の影響やノイズの影響により推定精度が悪化したためである。

## 5. まとめ

中空透明球体によって反射された 2 種類の鏡面反射光を用いた近接光源位置の推定手法を提案した。提案手法では対応する光源の反射光の組が必ず画像上で球中心を通るエピポーラ線上に存在するため、(1) 画像上で再投影誤差を最小化できる (2) 複数光源下においても対応する反射光の探索が容易であるという特長を持つ。実験では、1 台のカメラと単一の参照物体である中空透明球体を用い光源位置を推定し、推定精度を評価した。実験の結果、カメラの光学中心を通る透明球接線方向と、カメラの光学中心と球中心を通る直線周辺を除く領域において光源位置を推定できることを示した。また、実環境において

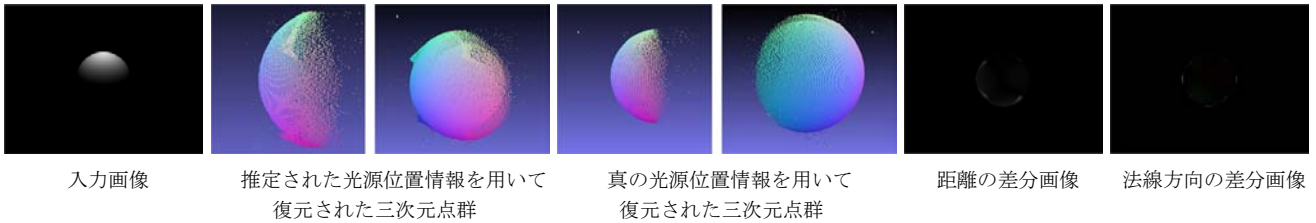


図 11 仮想環境における球の三次元復元結果. 左から順に 24 枚の入力画像の 1 枚, 推定された光源位置情報を用いて復元された三次元点群, 真の光源位置情報を用いて復元された三次元点群, 2 つの距離画像の差分の絶対値を 8 倍した結果, 2 つの法線画像の差分の絶対値を 8 倍した結果. 推定された法線のカラーコーディングの対応は  $(R, G, B) = (n_x + 1, n_y + 1, n_z + 1)/2$  を用いている.

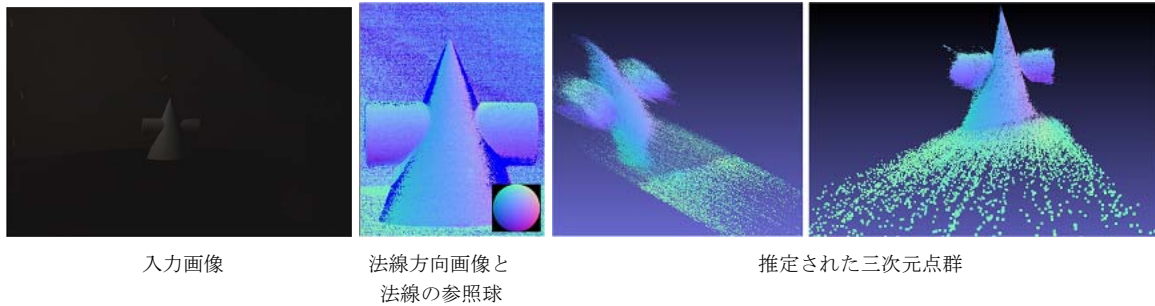


図 12 実環境における球の三次元復元結果. 左から順に 17 枚の入力画像の 1 枚, 法線方向画像と法線の参照球, 推定された光源位置情報を用いて復元された三次元点群

光源位置の推定精度の評価および複数光源下での光源位置推定実験を行い, 実環境でも安定に光源位置を推定できることを示した. これに加え, シミュレーション環境および実環境において, 提案手法によって推定された近接光源位置を用いて, 近接光源を用いた照度差ステレオ法により形状復元を行った. 実環境における実験では, 光源位置および法線方向は推定されたものの, 相互反射やノイズの影響で推定される形状の品質は十分なものではなかった. 今後, 実験結果を分析し, より高度な形状推定を実現するために, 様々な制約を用いた形状復元に取り組む予定である.

## 謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (基盤 A, No. 23240024) および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による.

## 文 献

- [1] B.K.P. Horn. Determining shape and reflectance using multiple images. In *MIT AI Memo*, 1978.
- [2] R.J. Woodham. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optimised Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 139–144, January 1980.
- [3] Y. Iwahori, H. Sugie, and N. Ishii. Reconstructing shape from shading images under point light source illumination. In *Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp. I: 83–87, 1990.
- [4] J.J. Clark and H. Pekau. An integral formulation for

- differential photometric stereo. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. I: 119–124, 1999.
- [5] J.J. Clark. Active photometric stereo. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 29–34, 1992.
- [6] M. Powell, S. Sarkar, and D. Goldgof. A simple strategy for calibrating the geometry of light sources. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23, pp. 1022–1027, 2001.
- [7] Hui-Liang. Shen and Yue. Cheng. Calibrating light sources by using a planar mirror. *J. of Electronic Imaging*, Vol. 20, pp. 013002–1–013002–6, 2011.
- [8] P.E. Debevec and J. Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photo graphs. In *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 369–378, 1997.
- [9] T. Takai, K. Niinuma, A. Maki, and T. Matsuyama. Difference sphere: an approach to near light source estimation. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004.
- [10] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Illumination distribution from brightness in shadows: adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision*, pp. 1–12, 1999.
- [11] 高井勇志, 牧淳人, 松山隆司. スケルトンキューブを用いた光環境推定. 画像の認識と理解シンポジウム, 第 1 巻, pp. 660–665, 2004.
- [12] 飯野晋, 高井勇志, 松山隆司. 物体の自己投射影 (セルフシャドウ) を利用した不定型近接光源の推定. 情報処理学会研究報告, No. 42, pp. 145–152, 2007.
- [13] 岡田徳次, 野口昌彦, 藤原茂. 球面上の反射点位置の計算方法. 計測自動制御学会論文集, 第 30 巻, pp. 943–952, 1994.
- [14] Persistence of Vision Raytracer. <http://www.povray.org/>.