

中空透明球体上の鏡面反射光を用いた 近接光源位置の推定

青 砥 隆 仁^{†1} 武 富 貴 史^{†1}
佐 藤 智 和^{†1} 横 矢 直 和^{†1}

近接光源位置の推定は、照度差ステレオ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方法を提案する。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、新たに提案する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、実画像およびシミュレーションにより光源位置の三次元復元を行い、その精度を評価する。

Position Estimation of Near Light Sources Using Specular Reflection on Clear Hollow Sphere

TAKAHITO AOTO,^{†1} TAKAFUMI TAKETOMI,^{†1}
TOMOKAZU SATO^{†1} and NAOKAZU YOKOYA^{†1}

Position estimation of near light sources is one of the important problems for 3D shape estimation by photometric stereo. In this report, we propose a novel method for estimating position of near light sources by using reflected positions of light sources on a clear hollow sphere. Conventionally, this problem has been solved by using observed reflected lights on multiple reference objects or self-shadows of a single reference object of known 3D shape. However, the former approach requires geometric calibration of reference objects, and the lat-

ter approach has a problem for estimating light positions stably due to many unknown parameters. In order to solve these problems, we propose a method for estimating positions of near light sources by using reflected positions of the two kinds, outside and inside, specular lights on a single clear hollow sphere. This method has the following features; (1) geometric calibration for multiple reference objects is not required. (2) positions of corresponding reflections are observed on an epipolar line and thus it is easy to find corresponding pair of reflected positions. (3) position of near light sources can be accurately and stably estimated by minimizing re-projection errors. In experiments, we demonstrate the effectiveness of our method showing the accuracy of light positions estimation, using simulation and real image data.

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、物体の詳細な形状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、物体形状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物体形状の復元を行っていた^{1),2)}。しかし、光源が十分遠方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、無限遠光源を仮定した手法を用いて精度良く物体形状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個使い、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、

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

この手法は光源位置を推定する際に光源位置と光学中心から球面上反射位置を求めることが困難であるという理由から、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二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徴がある反面、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で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。この手法は一般的な光源環境を扱え、無数の近接光源の集合により表現された光源環境を推定することができるが、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。

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。

- 事前の幾何学的キャリブレーションが不要
- 光源位置を安定に推定可能
- 広範囲の光源位置を推定可能

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

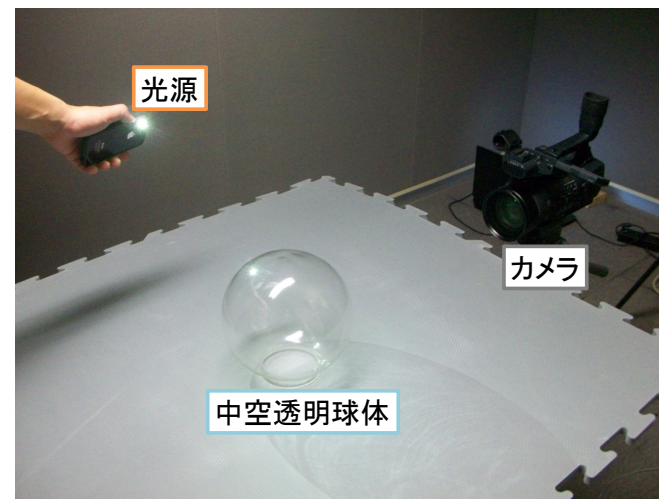


図1 中空透明球体
Fig. 1 Clear hollow sphere

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ビ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。

以下2節では、中空透明球体を用いた近接光源位置の推定手法について詳述する。3節では、CGシミュレーション環境における光源位置推定の精度結果と実環境における複数光源下での光源位置推定実験の結果を示す。最後に4節でまとめと今後の課題について述べる。

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、画像上における反射光の再投影誤差の最小化法と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

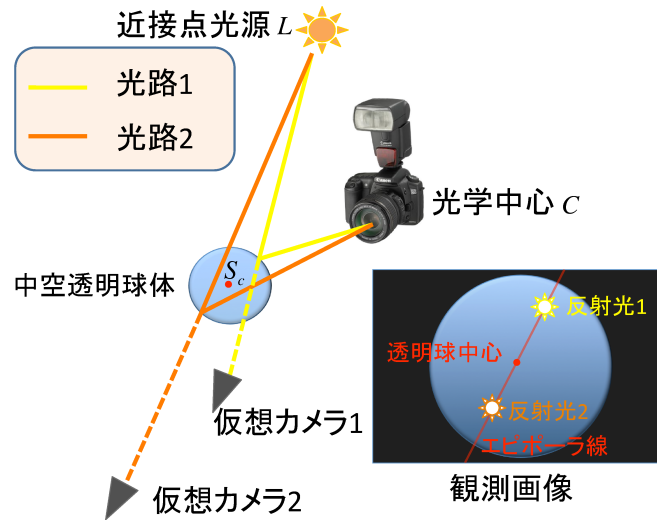


図 2 中空透明球を用いた光源位置推定
Fig. 2 Position estimation of near light sources using clear hollow sphere

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 3 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。なお、ここでは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。

2.2 再投影誤差の最小化

対応する反射光が決定した際、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生じ、この場合

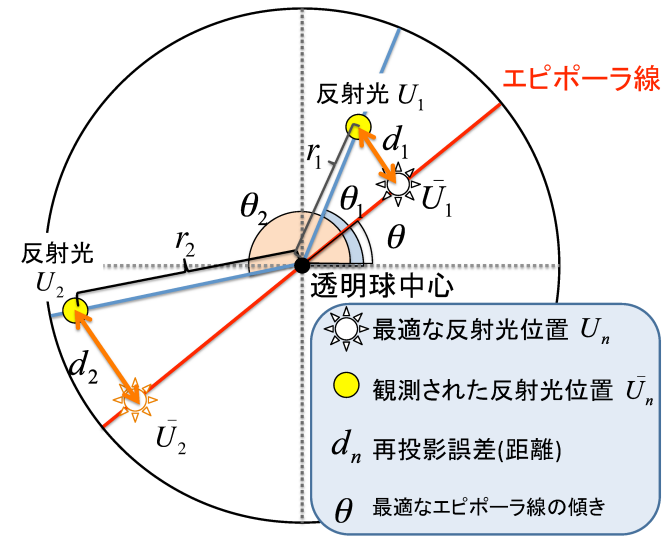


図 3 再投影誤差最小化
Fig. 3 Minimization of re-projection errors

には、画像上の再投影誤差 (対応点の検出座標と 3 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 3 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中点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画像上でエピポーラ線上で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。以下具体的な手法を述べる。ここでは簡単のため球中心が光軸上に存在する場合を考える。図 3 に示すように、画像上の横軸に対して、 θ 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。

$$E = d_1^2 + d_2^2, \quad d_1 = \|U_1 - \bar{U}_1\|, \quad d_2 = \|U_2 - \bar{U}_2\| \quad (1)$$

ここで、エピポーラ線の傾き θ 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。

$$\begin{cases} d_1 = |r_1 \sin(\theta - \theta_1)| \\ d_2 = |r_2 \sin(\theta - \theta_2)| \end{cases} \quad (2)$$

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 (1) に代入すれば E は θ の関数として以下のように表せる。

$$E(\theta) = (r_1 \sin(\theta - \theta_1))^2 + (r_2 \sin(\theta + \pi - \theta_2))^2 \quad (3)$$

ここで、 $E(\theta)$ を最小化する θ を求めれば \bar{U}_1, \bar{U}_2 の位置が定まる。ここで、 \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り、本手法では、これを光源の三次元位置とする。以下、エピポーラ線上の反射光の位置 \bar{U}_1, \bar{U}_2 から光源の位置を推定する手法を詳述する。

2.3 反射光を用いた光源位置の推定

本手法では、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3次元位置をカメラ座標系で推定する。ただし、透明球表面の反射は鏡面反射のみとする。ここで、図4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3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。

$$L_{(i)} = P_{(i,n)} + s_{(i,n)} l_{(i,n)} \quad (n=1,2) \quad (4)$$

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。

2.3.1 反射位置 $P_{(i,n)}$ 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。

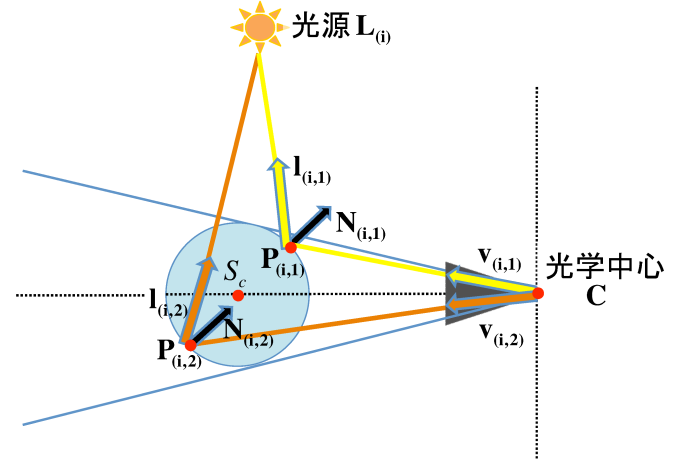


図4 光源位置が透明球を含む視体積外に存在する場合のエピポーラ平面断面図
Fig. 4 An epipolar plane image for the case light source position exists out of the view volume containing a clear hollow sphere

$$P_{(i,n)} = t_{(i,n)} \bar{v}_{(i,n)} \quad (5)$$

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。

$$\|S_c - P_{(i,n)}\|^2 = r^2 \quad (6)$$

式 (6) に式 (5) を代入することで、

$$t_{(i,n)}^2 \bar{v}_{(i,n)}^2 - 2t_{(i,n)} S_c \cdot \bar{v}_{(i,n)} + S_c^2 = r^2 \quad (7)$$

が得られる。従って $t_{(i,n)}$ は以下のように求まる。

$$t_{(i,n)} = S_c \cdot \bar{v}_{(i,n)} \pm \sqrt{D_{(i,n)}} \quad (8)$$

$$D_{(i,n)} = (S_c \cdot \bar{v}_{(i,n)})^2 - S_c^2 + r^2 \quad (9)$$

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。なお、画像上での球中心と画像中心の距離を r_q とおけば、 S_c は以下の式で算出できる。

$$S_c = \frac{r}{r_c} \sqrt{f^2 + r_q^2} v_{(S_c)} \quad (10)$$

ただし、 f はカメラの焦点距離、 r_c は画像平面上での透明球の半径、 $v_{(S_c)}$ は画像から推定さ

れる光学中心から見た透明球中心方向を表す単位方向ベクトルである。

2.3.2 光源方向ベクトル $l_{(i,n)}$ 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。

$$l_{(i,n)} = 2(N_{(i,n)} \cdot v_{(i,n)}) \cdot N_{(i,n)} + v_{(i,n)} \quad (11)$$

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。

2.3.3 光源位置 $L_{(i)}$ の推定

式 (5), (11) より $P_{(i,n)}$, $l_{(i,n)}$ が求めれば、これを式 (4) に代入して $L_{(i)}$ 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 $v_{(i,n)}$ に対して 2 つの反射位置 $P_{(i,n)}$ 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、 $P_{(i,n)}$ 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 $P_{(i,n)}$ 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) $\|L_{(i)} - S_c\| \geq r$: 光源は中空透明球体内に存在しない。

以上より、1 対の $\bar{v}_{(i,n)}$ から 1 対の反射点 $P_{(i,n)}$ 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 $L_{(i)}$ が求まる。ただし、図 5 に示すように、光源位置が透明球を含む視体積内に存在し、かつ球より遠方に存在する場合、光源位置 $L_{(i)}$ を上記手法で求めることができない。この場合には、光源位置 $L_{(i)}$ 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。

$$\begin{cases} L_{(i)} = t_{(i,1)} \bar{v}_{(i,1)} \\ L_{(i)} = s_{(i,2)} l_{(i,2)} + P_{(i,2)} \end{cases} \quad (12)$$

ただし、光源からの直接観測光が二つの光路の何れであるか未知の場合には、 $\bar{v}_{(i,n)}$, $P_{(i,n)}$ の組み合わせが 4 通り存在するが、上記の手法と同様に、条件 (1), (2), を用いることにより偽の $v_{(i,n)}$, $P_{(i,n)}$ の組み合わせを排除し、光源位置 $L_{(i)}$ 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。本実験においては、シミュレーション実験・実シーンでの実験ともに、観測される反射光の位置として画像上の球面領域内において白とびを起こしている領域の重心を用いた。

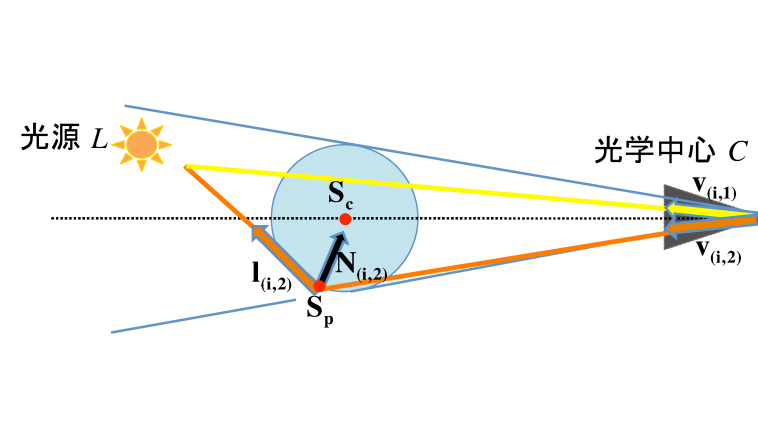


図 5 光源位置が透明球を含む視体積内に存在する場合のエピポーラ平面断面図
Fig. 5 An epipolar plane image for the case light source position exists inside the view volume containing a clear hollow sphere

3.1 CG シミュレーション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 6 に示すように、カメラ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 平面上で変化しながらカメラにより撮像される画像を pov-ray¹⁴⁾ を用いてレンダリングし、その画像を元に光源位置を推定・評価した。なお、本シミュレーションでは、水平画角約 60° , 垂直画角約 45° のカメラを想定し、カメラの解像度を 1024×768 ピクセル、カメラのレンズ歪みはないものとし、カメラ内部パラメータとして以下の内部パラメータ行列を用いた。

$$K = \begin{bmatrix} 870 & 0 & 511.5 \\ 0 & 870 & 383.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

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 ~

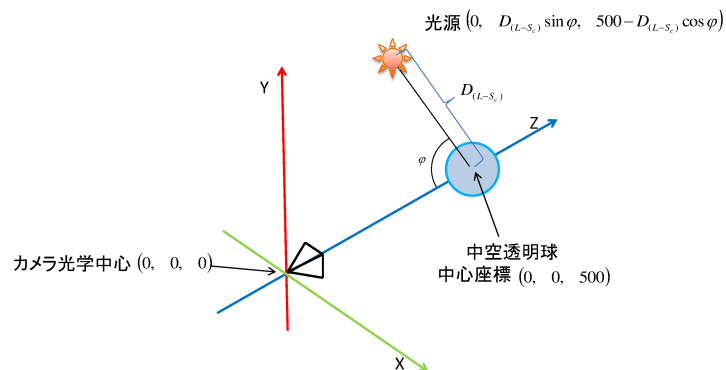


図 6 シミュレーション環境におけるカメラと中空透明球位置
 Fig. 6 Position of clear hollow sphere and camera in simulation environment

800mm の範囲で 10mm 間隔, 球中心から見た光源の方位角 ϕ を $0 \sim 180^\circ$ の範囲で 2° 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 4 種類の異なる標準偏差 $\sigma = (0, 0.2, 0.5, 1.0)$ ピクセルのノイズを付加したものを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積内に存在する場合には, 直接観測光を用いる式 (12) を用い, それ以外の場合には式 (4) を用いて光源位置を推定した。各々のノイズレベルに対する光源位置推定誤差の分布を図 7~ 図 10 に示す。図 7~ 図 10 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 万回の試行により平均したものである。なお, 図中の黒三角は光源位置, 二重丸は中空透明球中心, 透明球中心から 100mm ~ 800mm の範囲内における白色領域は光源位置の推定誤差が 30mm 以上および推定できなかった領域を表す。図 7 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

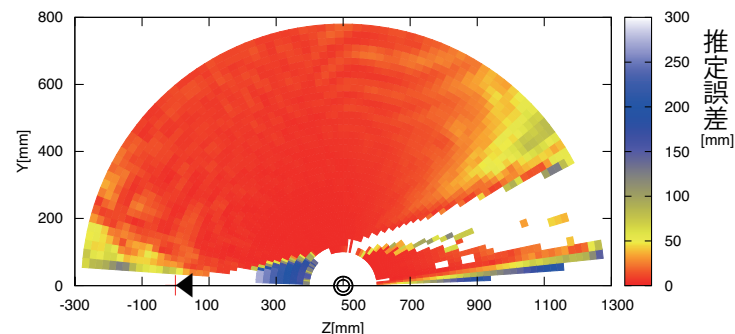


図 7 光源位置推定誤差の分布 ($x=0, \sigma = 0.0$)
 Fig. 7 A map of mean distance error in estimated light position($x=0, \sigma = 0.0$)

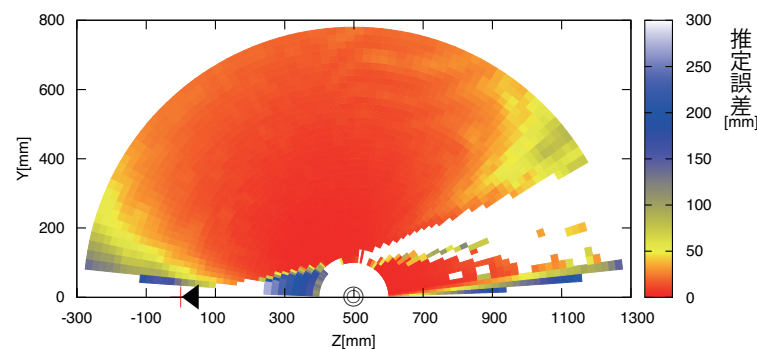


図 8 光源位置推定誤差の分布 ($x=0, \sigma = 0.2$)
 Fig. 8 A map of mean distance error in estimated light position($x=0, \sigma = 0.2$)

が観測される。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, 図 9, 図 10 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

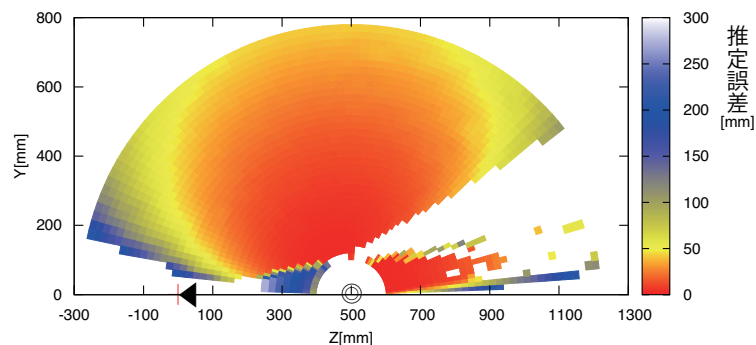


図 9 光源位置推定誤差の分布 ($x=0, \sigma=0.5$)

Fig. 9 A map of mean distance error in estimated light position($x=0, \sigma=0.5$)

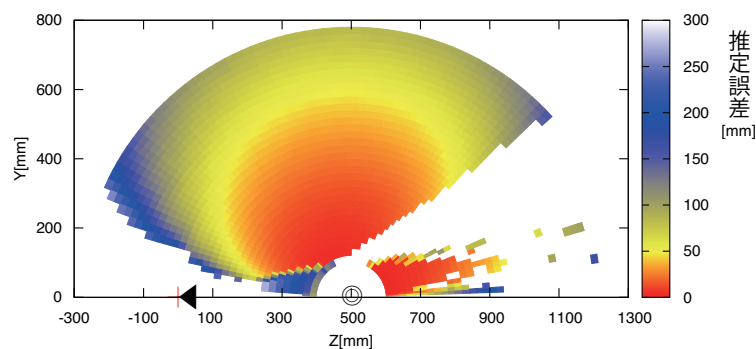


図 10 光源位置推定誤差の分布 ($x=0, \sigma=1.0$)

Fig. 10 A map of mean distance error in estimated light position($x=0, \sigma=1.0$)

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おり、このような条件下であれば、安定かつ高精度な光源位置推定が実現できることがわかる。

3.2 実環境における複数光源下での光源位置推定

本実験では、デジタルカメラ (Cannon EOS kiss Digital) を用いて、カメラから光源を直接観測できるように約 150cm の距離から半径 100mm, 厚さ 7mm の固定された中空透明を撮影した静止画像 (解像度 3072×2048) を用い、3 つの LED ライト位置を推定した。ただし、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

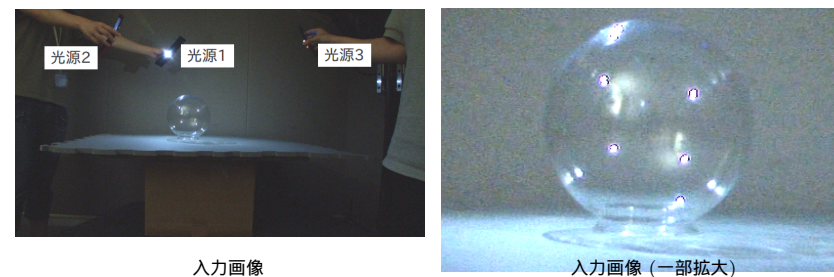


図 11 複数光源下での入力画像

Fig. 11 Input image under multiple light sources

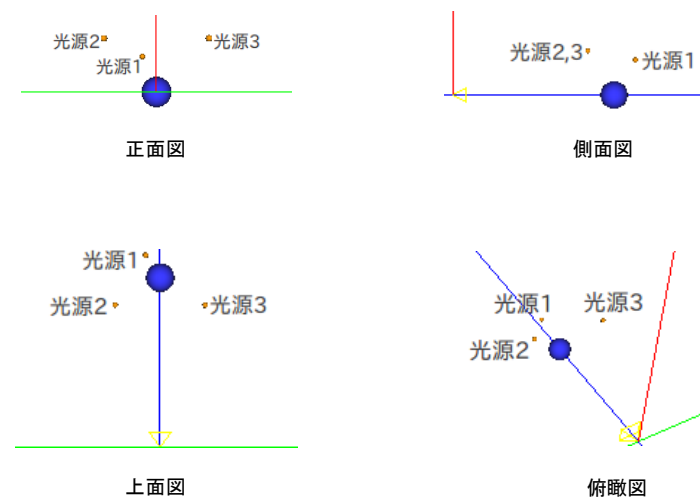


図 12 複数光源下での推定結果

Fig. 12 Estimation under multiple light sources

11 に入力画像, 図 12 にエピポーラ線上に存在する鏡面反射の組を用いてそれぞれの光源位置を推定した結果を示す. 図 11 に示した入力画像と図 12 に示した推定結果を比べる事で, 実シーンにおける複数光源下であってもおおむね正しく光源の位置関係を推定できることを確認した.

4. 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, 推定評価を行った. 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, 実環境において光源位置を推定できる事を示した. このことから, 本手法は照度差ステレオのように光学中心から光源までの相対的な位置関係を必要とするアプリケーションへ適用できると考えられる. 今後の課題として, 透明球表面部で起こる屈折の影響を考慮した近接光源の位置推定手法の考案などがあげられる.

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

参 考 文 献

- 1) Horn, B.: Determining shape and reflectance using multiple images, *MIT AI Memo* (1978).
- 2) Woodham, R.: Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optimised Engineering*, Vol.19, No.1, pp.139–144 (1980).
- 3) Iwahori, Y., Sugie, H. and Ishii, N.: Reconstructing shape from shading images under point light source illumination, *Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp.I: 83–87 (1990).
- 4) Clark, J. and Pekau, H.: An integral formulation for differential photometric stereo, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.I: 119–124 (1999).
- 5) Clark, J.: Active photometric stereo, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.29–34 (1992).
- 6) Powell, M., S.S. and Goldgof, D.: A simple strategy for calibrating the geometry of light Sources, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.23,

- pp.1022–1027 (2001).
- 7) Shen, H.-L. and Cheng, Y.: Calibrating light sources by using a planar mirror, *J. of Electronic Imaging*, Vol.20, pp.013002–1–013002–6 (2011).
- 8) Debevec, P. and Malik, J.: Recovering high dynamic range radiance maps from photo graphs, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp.369–378 (1997).
- 9) Takai, T., N. K. M.A. and Matsuyama, T.: Difference sphere: an approach to near light source estimation, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition* (2004).
- 10) Sato, I., S.Y. and Ikeuchi, K.: 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, Vol.1, 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, Vol.30, No.8, pp.943–952 (1994).
- 14) Persistence of Vision Raytracer, <http://www.povray.org/>