

# 平行光を用いた反射屈折撮像系におけるミラーの位置姿勢校正

青木 伸也<sup>†</sup> 佐川 立昌<sup>††</sup> 向川 康博<sup>††</sup>  
越後 富夫<sup>†††</sup> 八木 康史<sup>††</sup>

本論文では、反射屈折撮像系の校正における、鏡面の位置姿勢計測手法について述べる。反射屈折撮像系の校正は様々なパラメータの推定を含むが、ここでは撮像系に含まれる鏡面の位置姿勢推定に注目する。従来より、単一視点を持つ反射屈折光学系における校正手法が提案されたが、それらは鏡面の位置と形状に強い制約があった。それに対し、本論文では平行光源を用いて撮像系と観測対象の幾何学的関係を単純化することによって、鏡面の位置と形状に制約を設けずにその位置姿勢を計測する手法を提案する。撮像系に対して多方向から照射される平行光源を用いると、撮像系と観測対象の間の平行移動成分を未知パラメータから除去することができる。鏡面のモデルを用いて未知パラメータを含む形で予測される観測対象の射影像と、実際の撮像系で得られる射影像の誤差を最小化することにより、鏡面の位置姿勢を推定する。最後にシミュレーションと実画像を用いる実験によって、提案手法の精度を評価する。

## Mirror Localization of Catadioptric Imaging System Using Parallel Lights

NOBUYA AOKI,<sup>†</sup> RYUSUKE SAGAWA,<sup>††</sup> YASUHIRO MUKAIGAWA,<sup>††</sup>  
TOMIO ECHIGO<sup>††</sup> and YASUSHI YAGI<sup>††</sup>

This paper describes a method of mirror localization to calibrate a catadioptric imaging system. While the calibration of a catadioptric system includes the estimation of various parameters, we focus on the localization of the mirror. Since some previously proposed methods assume that the system is single view point, they have a strong restriction on the position and shape of the mirror. We propose a method that uses parallel lights to simplify the geometry of projection to estimate the position of the mirror, and so does not restrict the position and shape of the mirror. We omit the translation between a camera and calibration objects from the parameters to be estimated by observing some parallel lights from a different direction. We obtain the constraints on the projection and can compute the error between the model of the mirror and the measurements. The position of the mirror is estimated by minimizing the error. We also test our method by simulation and real experiments, and evaluate the accuracy of our method.

### 1. はじめに

反射屈折撮像系は、鏡面での光線反射を観測する撮像系であり、様々な視野範囲を得るためにしばしば用いられている。特に、反射屈折撮像系を用いた全方位視覚システムは、ロボット誘導、監視、バーチャルリアリ

ティなど様々な分野で幅広く用いられている<sup>10),15),17)</sup>。

反射屈折光学系は、大きく分けて単一視点系と非単一視点系の2つに分類される。前者は単一の視点を持ち、後者は複数の視点を持つ。これらの反射屈折光学系の幾何学的な分析のために、カメラと鏡面の両方を校正することが必要である。

単一視点の反射屈折光学系は、得られた画像を透視射影画像に変換するには都合がよいが、鏡面の形状と位置に強い制約がある。たとえば、テレセントリックカメラと放物面鏡を用いる場合、カメラの光軸と放物面鏡の軸が一致している必要がある。そのため、鏡が正しい位置に設置されないと、単一視点特性が失われる。単一視点の反射屈折光学系に対して、いくつかの校正手法が提案されている。Geyerら<sup>3)</sup>は、3本の直

<sup>†</sup> 近畿大学生物理工学部

Faculty of Biology-Oriented Science and Technology,  
Kinki University

<sup>††</sup> 大阪大学産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research,  
Osaka University

<sup>†††</sup> 大阪電気通信大学情報工学科

Department of Engineering Informatics, Osaka Electro-  
Communication University

線を用いて焦点距離や鏡面中心位置を求めた．Yingら<sup>18)</sup>は直線と球をパラメータの校正に使った．しかしながら、これらの手法は光学系が単一視点であることを想定しているため、非単一視点の反射屈折光学系には適用できない．

一方、様々な目的のために、いくつかの非単一視点の反射屈折光学系が提案されている<sup>2),5)~7)</sup>．非単一視点の反射屈折光学系の校正にも、いくつかの手法が提案されている．Aliaga<sup>1)</sup>は既知の3次元点を用いて、パースペクティブカメラと放物面鏡を用いた反射屈折光学系のパラメータを推定した．Strelowら<sup>13)</sup>は既知の3次元点を用いて、光軸の一致していない鏡面の位置を推定した．Micusikら<sup>9)</sup>は鏡面の輪郭を楕円に近似し、非単一視点カメラを単一視点カメラに近似することにより校正を行った．Mashitaら<sup>8)</sup>は双曲面鏡の輪郭を用いて、光軸の一致していない鏡面の位置を推定した．しかしながら、これらの手法はすべて、全方位視界を得ることを目的とした反射屈折光学系に制限されている．

より一般的な光学系の校正手法としては、次のようなものがある．Swaminathanら<sup>16)</sup>は、既知のカメラ運動から得られる複数の画像間の点の対応から、火面 (caustic surface, 収差がある光学系を通過した光線束の中で、光線の集中密度が高い点を連ねてできる曲面のこと) を推定することにより、非単一視点の反射屈折光学系のパラメータを求めた．Grossbergら<sup>4)</sup>は一般化撮像モデルを提案し、既知の3次元空間中の2枚の平面を用いて、画像の各画素に対応する光線方向を求めることにより、校正を行った．Sturmら<sup>14)</sup>は既知の物体と未知のカメラ運動から、一般化撮像モデルの校正を行う手法を提案した．Pless<sup>12)</sup>は structure from motion (SFM) 手法に基づいて複数カメラシステムの位置を推定した．これらの手法は撮像系の内部および外部のパラメータを推定するため、測定値の誤差はすべてのパラメータの推定誤差に影響を与える．

本論文では、反射屈折撮像系の校正において、撮像系を構成するカメラに対する鏡面の相対的な位置姿勢の推定に注目する．それ以外のパラメータについては以下のように仮定する：

- カメラの内部パラメータは既知とする．
- 鏡面の形状は任意であるが、既知であるものとする．
- 世界座標系への変換は校正から除外する．

提案手法では平行光線を照射する光源 (これを平行光源と呼ぶ) を校正に用いる．平行光線のもとで撮像系が平行移動しても、撮像系に対する光線の照射方向

は変化しないので、撮像系の平行移動に対する光源の相対的な運動を未知パラメータから除外することができる．最終的に求めたいものは鏡面の平行移動と回転に関するパラメータだけであるが、推定手法によっては校正のための特徴点に関する未知パラメータを同時に推定しなければならないことがあり、この場合推定に必要な観測データ量が増加するため、そこに含まれる誤差の影響が大きくなり、推定精度は悪くなる．校正のための特徴点として平行光源を用いることにより、本来は不必要であるが同時に推定しなければならない未知パラメータの数を減少させることができ、推定精度を向上させることができる．

2章では、点光源および平行光源を用いた場合の射影モデルと推定すべきパラメータの違いについて述べる．3章では、平行光源を用いて鏡面の位置姿勢校正を行う手順について述べる．4章では、提案手法の有効性を確認する実験とその結果について述べる．5章では本論文をまとめる．

## 2. 射影の幾何学

本章では、撮像系の校正のために用いる光源または特徴点の差異によって生じる射影の違いについて述べる．

### 2.1 有限の距離にある点光源からの射影

撮像系の校正を行うために、撮像系から有限の距離にある物体上の特徴点を射影するとき、特徴点から放射されるかまたは特徴点上で反射された光が撮像系に到達する．したがって、物体が発光体であるかどうかにかかわらず、物体上の特徴点は撮像系から有限の距離にある点光源と見なすことができる．

図1は有限の距離にある点光源からの射影を示す．点光源の3次元位置は  $p$  である．点光源からの光線は鏡面上の点  $x$  において反射される．反射した光線

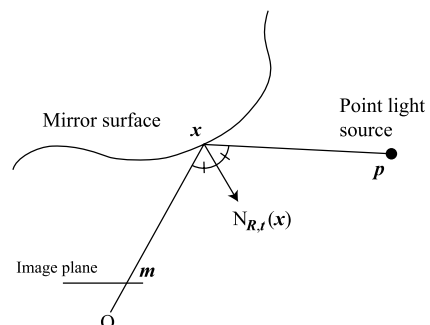


図1 点光源から反射屈折撮像系への射影  
Fig. 1 Projecting a point light source to a catadioptric imaging system.

は撮像面上の点  $m$  を通過してカメラの主点  $O$  に到達する．鏡面において光線の入射角と反射角は等しいので，次式が成り立つ．

$$\frac{p-x}{\|p-x\|} - \frac{m}{\|m\|} = aN_{R,t}(x) \quad (1)$$

ここで， $N_{R,t}(x)$  は点  $x$  における鏡面の法線ベクトルである． $R$  と  $t$  はそれぞれ鏡面の回転と移動を表し， $a$  はスケール係数である．式 (1) からスケール係数を除くことにより，2 つの方程式が得られる．

未知パラメータに関して，次の 3 通りの場合が考えられる．

- 撮影されるすべての特徴点の 3 次元位置が未知である場合
- 特徴点どうしの 3 次元空間内における相対位置は既知であるが，カメラと特徴点との相対位置は未知である場合（すなわち特徴点群が既知の寸法を持つ観測対象物をなしているが，その観測対象物とカメラとの相対位置は未知である場合）
- カメラとすべての特徴点の相対位置が既知である場合

最初の場合，カメラと 3 次元点の位置を同時に推定する SFM に対応する．もし光源位置  $p$  が未知であるなら，推定されるパラメータは  $R, t, R_C, t_C, p$  である．ただし  $R_C$  と  $t_C$  はそれぞれ映像を取得したときのカメラの回転と位置を表すパラメータである． $n$  個の点光源が  $k$  枚の画像によって観測されるとき，求めるべき未知パラメータの個数は  $6+6k+3n$  個であり，方程式の数は  $2kn$  個である．方程式の数は少なくとも未知数の個数だけ必要なので  $k=3, n=8$ ，あるいは  $k=4, n=6$  とすると，未知パラメータは少なくとも 48 個ある．実際に求めたいパラメータは  $R$  と  $t$  だけであるにもかかわらず，同時に推定しなければならないパラメータの個数はきわめて多い．

2 番目の場合は，チェッカーボードや直線，円など，構造化された観測対象を使った校正に対応する．観測対象上の被測定点の相対位置が既知であれば，推定すべき未知パラメータは  $R, t, R_C, t_C$  である．取得する画像の枚数が  $k$  枚であるとき，未知パラメータの個数は  $6+6k$  となるが，制約条件の数は観測対象と射影モデルの両方から従って変化する．未知パラメータの最小個数は 12 個であるが，射影モデルを単一視点であると仮定しないため，一般化した反射屈折撮像系の校正に必要な未知パラメータの個数はもっと多い．

3 番目の場合は，カメラ座標系における観測対象の位置が既知の場合であり，推定されるパラメータは  $R$

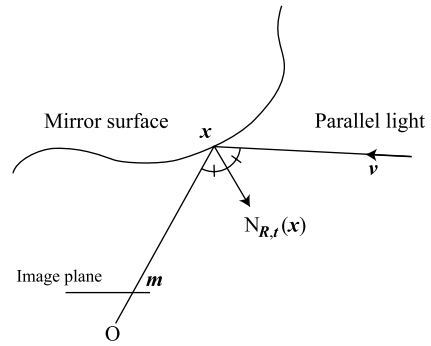


図 2 平行光源から反射屈折撮像系への射影  
Fig. 2 Projecting a parallel light to a catadioptric imaging system.

と  $t$  のみである．未知パラメータの個数は 6 個となる．しかしながら，被測定点の位置  $p$  は，世界座標系において未知のカメラ原点からの相対位置であるから，実際には測定することは難しい．したがって，この方法での精度は良くない．

## 2.2 平行光源からの射影

2.1 節で述べた有限の距離にある物体の特徴点に代えて，無限遠方にあると見なせる物体の特徴点を用いて撮像系の校正を行う場合は，特徴点から撮像系に向かう光は平行光線と見なせる．この場合，撮像系と特徴点が相対的に平行移動しても，撮像系への光線の入射方向は変化しない．そのため，推定すべき未知パラメータの個数を減らすことができる．また，無限遠方の特徴点の代わりに平行光源を使用した場合でも同様である．

図 2 は平行光源からの射影を示す．図 1 との違いは，光源が方向ベクトル  $v$  を持つ平行光になっている点である．平行光が無遠にある点光源からの照射に等しいことから， $v$  は次式のように表される．

$$v = - \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{sp-x}{\|sp-x\|} \quad (2)$$

したがって，射影に関する方程式は次のようになる．

$$-v - \frac{m}{\|m\|} = aN_{R,t}(x) \quad (3)$$

式 (3) からスケール係数を除去すると，2 つの方程式が得られる．平行光源を用いた場合，光源の平行移動に関するパラメータが除去されることが分かる．光線ベクトル  $v$  はカメラ座標系に対する相対的な方向であるから， $v$  は実際には 2 個のパラメータで構成される．そのため，カメラを回転させて  $k$  枚の画像を取得し， $n$  個の異なる平行光源を観測するとき，未知パラメータの個数は  $6+3k+2n$  個となる．

次節で提案する手法では，鏡面の位置を推定するた

めに、ターンテーブルを用いてカメラを回転させる。カメラ座標系においてカメラの平行移動量を計測することは難しいが、ターンテーブルの回転量はエンコーダを用いて正確に測定することができる。平行光源どうしの相対的な方向は既知であるから、その他の未知パラメータは、カメラの回転と平行光源の方向である。したがって、未知パラメータの個数は  $6 + 3 + 2$  個に減少する。

さらに、本手法では鏡面の位置姿勢推定から光源方向の推定を独立させ、問題を次の2つのステップに分離する。すなわち、最初に平行光源の方位を推定し、続いて鏡面の位置姿勢を推定する。それぞれのステップでの未知パラメータの個数は2個および9個である。これは点光源を用いる場合よりもずっと少ない。

### 3. 平行光源を用いた鏡面の位置姿勢校正

本章では鏡面の位置姿勢を推定するための手順について述べる。本手法は2つのステップから構成される。

- (1) 平行光源の方向を推定する。
- (2) 鏡面の位置姿勢を推定する。

図3は推定のためのシステム概念を示す。まずカメラと鏡から構成される反射屈折光学系を想定する。鏡面は任意形状のものを扱うため、形状のメッシュモデルが与えられているものとする。またカメラの内部パラメータは既知とする。この反射屈折撮像系を2軸のターンテーブルに搭載し、回転させる。2つの回転軸は互いに直交しているものとする。カメラと鏡面の位置関係は回転によって変化しない。平行光を照射するために、遠方の点光源の代わりに放物面鏡を利用した平行光照射灯を使用する。これは点光源を放物面鏡の焦点に置いたもので、点光源からの光が鏡面で反射されると、反射光は平行光線となる。テーブルが回転

すると、反射屈折撮像系は様々な方向から平行光を照射される。

#### 3.1 平行光源の方向の推定

ターンテーブルによって回転する撮像系が平行光の像を取得するとき、回転パラメータが異なるにもかかわらず、光像位置が一致するような場合がある。すなわち、撮像系の2通りの回転の仕方を表す回転行列  $R_{T1}$  と  $R_{T2}$  を考えるとき、 $R_{T1}$  と  $R_{T2}$  が等しくなくともかかわらず光像位置  $m_1$  と  $m_2$  が等しくなるような場合である。カメラが平行光の方向ベクトルを軸とする回転を行うとき、その回転によって光像位置は変化しないためである。もし光像位置が等しければ、撮像系を基準とする座標系における平行光の方向ベクトルは等しい。すなわち

$$R_C R_{T1} v_0 = R_C R_{T2} v_0 \quad (4)$$

ここで  $v_0$  は世界座標系における平行光の方向ベクトル、 $R_C$  はターンテーブルが基準状態（回転していない状態）にあるときのターンテーブルに対する撮像系の相対的な回転を表す行列である。照射しているのが平行光であるため、カメラの回転にともなうカメラ原点の平行移動は方程式に現れない。式(4)は次のように変形される。

$$(R_{T1} - R_{T2})v_0 = 0 \quad (5)$$

したがって、 $v_0$  は  $(R_{T1} - R_{T2})^T (R_{T1} - R_{T2})$  の最小の固有値に対応する固有ベクトルとして求めることができる。 $R_{T1}$  と  $R_{T2}$  の組は無数に存在するので、その中から  $(R_{T1} - R_{T2})^T (R_{T1} - R_{T2})$  が縮退しないものを選ぶものとする。1組の  $R_{T1}$  と  $R_{T2}$  があれば  $v_0$  を求めることができるが、対になる画像が複数組得られた場合は、それぞれから求めた結果を平均することにより  $v_0$  を決定するものとする。

撮像系を回転させながら平行光源の光像を多数取得し、その中から、回転の仕方が異なっていて光像位置が一致するものを探す。ターンテーブルの2つの回転軸の回転を表す行列をそれぞれ  $R_\theta$ ,  $R_\phi$  とするとき、 $R_T$  は次式で表される。

$$R_T = R_\theta R_\phi \quad (6)$$

実際には、回転パラメータが異なっていて光像位置が完全に一致するような画像の組を見いだすことは難しいので、内挿計算によって対応する回転パラメータを求める。図4は取得された画像上での光像位置を示す。回転パラメータ  $(\theta_1, \phi_1)$  に対応する光像の近くに、回転パラメータ  $(\theta_2, \phi_2)$  に対応する光像があったとする。 $v_1, v_2$  は像面上での2次元ベクトルであり、それぞれ回転パラメータ  $(\theta_1 + \Delta\theta, \phi_1)$ ,  $(\theta_1, \phi_1 + \Delta\phi)$  に対応する光像へのベクトルである。 $(\theta_1, \phi_1)$  の光像

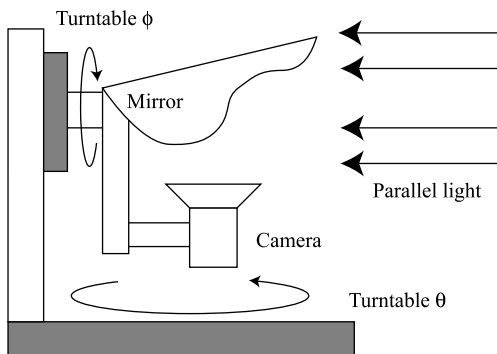


図3 平行光源とターンテーブルを用いた校正システム  
Fig. 3 Calibration system using parallel lights: The camera and mirror is rotated by two turntables.

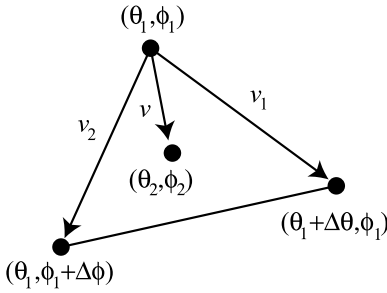


図 4 対応する回転パラメータの算出

Fig. 4 Finding the corresponding rotation parameters, by which parallel lights are projected onto the same point.

から  $(\theta_2, \phi_2)$  の光像へのベクトルが  $v$  であって、 $v$  が定数  $a, b$  によって  $v = av_1 + bv_2$  と表されるとき、 $(\theta_2, \phi_2)$  と同じ光像位置をとる回転パラメータは  $(\theta_1 + a\Delta\theta, \phi_1 + b\Delta\phi)$  と内挿される。

内挿によって回転パラメータに加わる誤差の影響は、必要な光像位置のどの程度近傍に実際の光像データが得られるかによって決まる。そのため実際には、ターンテーブルと平行光源の大まかな位置関係から、光像位置がおおむね一致する回転パラメータの組をあらかじめ求めておき、その近傍でターンテーブルを密に作動させて、必要な光像位置の十分近傍に実際の光像データが得られるようにする。

### 3.2 鏡面の位置姿勢の推定

鏡面の位置姿勢の推定は、次の評価関数の最小値探索問題に帰着できる。

$$\sum_m \|N_{R,t}(x) - n\|^2 \quad (7)$$

ここで  $n$  は、図 2 における平行光の方向ベクトル  $v$  と撮像系からの視線ベクトル  $m$  との間の角を 2 等分するベクトルであり、 $-v - m/\|m\|$  で求められる。また、反射点における鏡面の法線ベクトル  $N_{R,t}(x)$  は規格化されており、 $\|N_{R,t}(x)\| = 1$  とする。

式 (7) の最小値探索は非線型の最小化問題であるので、ここでは Levenberg-Marquardt アルゴリズムによって  $R, t$  および  $R_C$  を推定する。ミラーの位置姿勢推定アルゴリズムは次のようになる。

- (1)  $R, t$  および  $R_C$  の初期パラメータを設定する。
- (2) 視線ベクトル  $m$  に対応する反射点  $x$  を求める。
- (3) 評価関数式 (7) の値を計算する。
- (4) Levenberg-Marquardt アルゴリズムを用いて  $R, t$  および  $R_C$  の値を更新する。
- (5) 収束するまで (2) から (4) を繰り返す。

この最小値探索において初期解と最適解の間に極小値が存在した場合、局所最適解に陥る可能性があるが、

通常は鏡面には滑らかに変化する形状が用いられ、非常に複雑な形状ではない場合、局所最適解の数は多くないと予想される。 $R, t$  および  $R_C$  の初期パラメータとして反射屈折撮像系の設計値を用いれば真値の比較的近傍から探索を開始することができるため、最適解に収束することが期待できる。

以下では  $n$  と  $N_{R,t}(x)$  の計算方法について述べる。前節の方法で世界座標系における光線ベクトル  $v_0$  が求められると、撮像系を基準とする座標系における光線ベクトル  $v$  はターンテーブルの回転を表す行列  $R_T$  を用いて次のように求められる。

$$v = R_C R_T v_0 \quad (8)$$

カメラの内部パラメータは既知であるものと仮定しているため、カメラからの視線ベクトル  $m$  はカメラで撮像された光像の像面上での座標から得られる。

反射点  $x$  は、視線ベクトル  $m$  と鏡面との交点であるため、そこでの法線ベクトル  $N_{R,t}(x)$  は  $R, t$  および  $m$  の関数として表現される。本論文では鏡面の形状を規定していないため、代数的な扱いによって法線ベクトルの求め方を示すことはできないので、数値計算によって法線ベクトルを求めることにする。反射点  $x$  は、鏡面の回転および位置パラメータ  $R, t$  とカメラの内部パラメータを用いて鏡面メッシュモデルを像面に射影することによって求められる。法線ベクトルは鏡面メッシュモデル上の反射点  $x$  における法線として求められる。

## 4. 実験

### 4.1 シミュレーションによる精度評価

本論文で提案した手法の精度を評価するため、シミュレーションを行った。このシミュレーションでは、カメラに対する放物面鏡の相対位置姿勢を推定する。提案手法は 2 つのステップから構成されるため、それぞれについて評価を行った。

まず、光線ベクトルの推定精度の評価を行った。このシミュレーションでは、40 度の視野角を持つパースペクティブカメラを想定した。このカメラで得られる画像の解像度は  $640 \times 480$  ピクセルとした。放物面鏡の曲率半径  $h$  は 2.5 mm とした。この鏡面の形状は関数  $z = (1/2h)r^2$  で表される (ただし  $r^2 = x^2 + y^2$ )。鏡面の直径は 10 mm、高さは 5 mm とした。鏡面のメッシュモデルは 1 辺約 0.05 mm の三角形を用いて構成した。鏡面は基準位置から各座標方向に (0.3, -0.6, 18.0) mm だけ移動した位置に置かれ、傾斜角度は各軸回りに (1.2, -0.8, 0.0) [deg] とした。以上の設定で、レイトレーシングソフトウェアを使ってカメラで得ら

表 2 鏡面位置姿勢の推定手法の比較 Proposed method：平行光源を使用する提案手法，Method 1：構造化された点光源を使用する手法，Method 2：点光源を使用する SFM 手法

Table 2 Comparison of three methods for estimating the mirror position. Methods 1 and 2 use point light sources as feature points. In Method 1 the relative positions between points are known. In Method 2 the positions of points are completely unknown.

Method	# of mirror parameters	# of camera positions	# of features	# of external parameters	# of param. of features	total # of parameters	total # of constraints
Our method	6	1	6	3	0	9	12
	6	1	24	3	0	9	48
Method 1	6	4	6	24	0	30	48
Method 2	6	4	6	24	18	48	48

表 1 平行光源方向の推定誤差評価 Mean：平均誤差 [deg] Std.：標準偏差 [deg]

Table 1 Error of estimated parallel light direction: The mean angular error and the standard deviation (Std.) of the error (degree).

$\sigma$ (pixels)	1 pair		6 pairs	
	Mean	Std.	Mean	Std.
0.0	0.008	0.004	0.005	0.001
0.1	0.053	0.030	0.024	0.014
0.5	0.205	0.104	0.078	0.038

れる画像をシミュレーションし、その光像位置にノイズを加えたものを使って光線方向を算出して、誤差を評価した。結果を表 1 に示す。画像上の光像位置には  $N(0, \sigma^2)$  の正規分布ノイズを加えた。ここで加えたノイズは、デジタル画像データから光像位置を計測する際の 1 [pixels] 未満の量子化誤差を想定している。誤差の評価値としては、シミュレーションに用いた光線ベクトルと、推定結果として算出された光線ベクトルとのなす角度をとった。光線ベクトル推定に 1 組の画像を用いる場合と 6 組の画像を用いる場合を比較したところ、6 組の画像を用いた場合のほうが誤差が減少することが示された。

次に、鏡面の位置姿勢の推定精度の評価を行った。このシミュレーションでは  $512 \times 512$  ピクセルの解像度を持つパースペクティブカメラを想定した。鏡面は放物面形状で、曲率半径は 9.0 mm、直径は 25.76 mm、高さは 9.0 mm とした。鏡面の軸はカメラの光軸と一致し、カメラと鏡面の距離は 50.0 mm とした。提案手法の精度を実証するため、表 2 に示すように未知パラメータの個数を変えて、3 種類の手法で鏡面の位置姿勢の推定を行った。手法 1 と手法 2 では特徴点としてカメラから 100 [mm] 離れた位置にある 6 個の点光源を用いるため、鏡面の位置姿勢と同時に点光源の位置も推定しなければならない。手法 1 と 2 ではカメラを動かすことが必要なので、10 [mm] ずつ動かした

4 カ所から撮影した。手法 2 では点光源間の相対位置は未知であるとするのに対し、手法 1 では点光源それぞれの相対位置は既知であるものとした。そのため、手法 2 は SFM 手法であり、手法 1 は構造化された観測対象を用いた校正手法である。手法 1 と 2 では評価関数式 (7) 内のベクトル  $n$  を次式で求めた。

$$\frac{\frac{p' - x}{\|p' - x\|} - \frac{m}{\|m\|}}{\left\| \frac{p' - x}{\|p' - x\|} - \frac{m}{\|m\|} \right\|} \quad (9)$$

ここで  $p'$  はカメラ座標系における点光源の位置であり、 $p' = R_C p + t_C$  である。手法 2 では点光源の位置  $p$  は未知パラメータである。提案手法では平行光源が 6 点の場合に加えて、24 点を用いた場合も想定した。

以上の条件で生成したシミュレーション画像上の光像位置に正規分布ノイズを加えたものをもとに、鏡面の位置姿勢の推定を行い、誤差を算出した。ノイズの標準偏差  $\sigma$  は 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 [pixels] の 4 通りとした。提案手法での鏡面の位置姿勢推定においては、それに使用する平行光源の方向ベクトルにも正規分布ノイズを加えた。ノイズの標準偏差は、0.0, 0.1, 0.5 [degree] の 3 通りとした。

各手法による鏡面位置の計測誤差を図 5 に示す。横軸は光像位置に加えられたノイズ強度であり、縦軸は鏡面位置の計測誤差 [mm] である。提案手法の計測誤差は手法 2 の 4 分の 1 程度、手法 1 の半分程度であり、提案手法が有効に働いているといえる。特徴点数を他の手法と同じ 24 点にするとさらに誤差を小さくできる。

各手法による鏡面位置の推定値を用いて点光源の光像が得られる位置を再投影計算し、それと本来の光像位置との位置誤差を求めたものを図 6 に示す。横軸は光像位置に加えられたノイズ強度であり、縦軸は再投影された光像と本来の光像との位置誤差 [pixels] であ

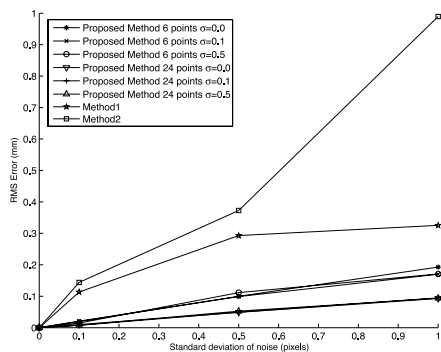


図 5 鏡面位置の推定誤差の比較  
Fig. 5 Error in estimating the mirror position.

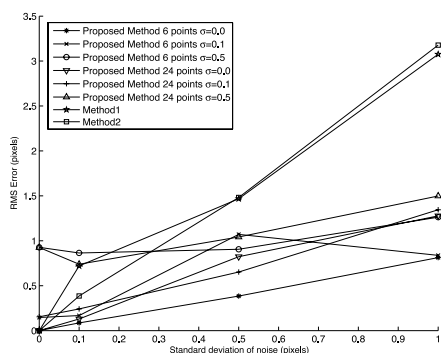


図 6 推定された鏡面位置による光像の再投影誤差の比較  
Fig. 6 Reprojection error of light source image.

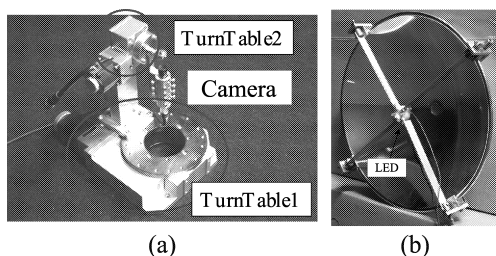


図 7 実験装置  
Fig. 7 Experimental calibration system.

る．光像位置に加わるノイズ強度が 0.5 [pixels] 程度であれば，再投影誤差は 1.0 [pixels] より小さくなり，反射屈折撮像系として十分な精度が得られているといえる．本シミュレーション実験において，非線形最小値探索の計算所用時間は PC を用いて数秒程度である．

4.2 実画像を用いた位置姿勢推定

実画像から鏡面の位置を推定する実験を行うため，直交 2 軸ターンテーブルを用いた実験装置を製作した (図 7(a))．カメラと鏡面から構成される撮像系がターンテーブルに搭載される．また，平行光源として，放物

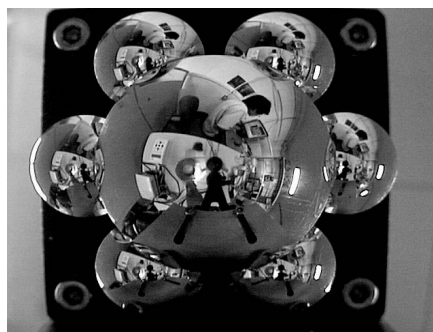


図 8 複合放物面鏡  
Fig. 8 Compound parabolic mirrors.

面鏡と LED を用いた照明装置を製作した (図 7(b))．LED は放物面鏡の焦点に取り付けられている．この実験では，複数の放物面鏡を複合した反射屈折撮像システムについて，鏡面の位置を推定する．この反射屈折撮像システムは Kojima ら<sup>6)</sup> によって提案されたものである．カメラから取得される画像の例を図 8 に示す．このシステムは 7 個の放物面鏡を組み合わせた複合放物面鏡とパースペクティブカメラを使用している．ただし今回は中央の鏡のみ使用した．カメラの内部パラメータは OpenCV<sup>11)</sup> を用いて求めた．中央鏡の曲率半径は 9.0 mm，直径と高さは 25.76 mm と 9.0 mm である．この設計パラメータをもとに，計測プログラム内部では鏡面の形状を約 68,000 分割したメッシュモデルで表現している．

光源方向の推定には，ターンテーブルを回転させて光像位置がおおむね一致する画像が得られる点を探索し，その近傍で 0.2 [degree] 刻みでターンテーブルを動かして 18 枚の画像を取得した．鏡面位置姿勢の推定には鏡面上のなるべく広い範囲に光像が現れるようにターンテーブルを回転させ，90 枚の画像を取得して使用した．

カメラに対する鏡面の位置姿勢は他の方法での正確な測定が困難であるため，光源方向ベクトルと鏡面の位置姿勢の推定値およびターンテーブルの回転角データを用いて，光源の光像が得られる位置を再投影計算し，実画像の光像位置との誤差の平均値を求めると，0.49 [pixels] なる値が得られた．再投影誤差が 1 [pixels] より小さいことから，本手法によって鏡面位置姿勢が反射屈折撮像系として十分な精度で得られているといえる．

5. おわりに

本論文では，反射屈折撮像系において，それに含まれる鏡面の位置姿勢を校正する手法について述べた．

本手法では、撮像系と基準となる被観測物の幾何学的関係を単純化するため、被観測物として平行光源を用いた。これにより、撮像系と被観測物の距離に関する未知パラメータを除去することができるため、推定すべき未知パラメータを減らすことができた。本手法では、まず平行光源の方向を推定し、その結果を用いて鏡面の位置姿勢を推定するという手順をとった。

また、シミュレーションおよび実画像を用いた実験を行い、提案手法によって鏡面の位置姿勢の推定が可能であり、かつ精度が向上することを示した。今後の課題としては、平行光源を用いた位置姿勢推定手法をより一般的な撮像系の校正に応用することがあげられる。

### 参 考 文 献

- 1) Aliaga, D.: Accurate catadioptric calibration for realtime pose estimation of room-size environments, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.1, pp.127–134 (2001).
- 2) Gaspar, J., Decco, C., J.O. Jr. and Santos-Victor, J.: Constant resolution omnidirectional cameras, *Proc. 3rd Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.27–34 (2002).
- 3) Geyer, C. and Daniilidis, K.: Paracatadioptric camera calibration, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.24, No.5, pp.687–695 (2002).
- 4) Grossberg, M. and Nayar, S.: A general imaging model and a method for finding its parameters, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.2, pp.108–115 (2001).
- 5) Hicks, R. and Perline, R.: Equi-areal catadioptric sensors, *Proc. 3rd Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.13–18 (2002).
- 6) Kojima, Y., Sagawa, R., Echigo, T. and Yagi, Y.: Calibration and performance evaluation of omnidirectional sensor with compound spherical mirrors, *Proc. 6th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Nonclassical cameras* (2005).
- 7) Kondo, K., Yagi, Y. and Yachida, M.: Non-isotropic omnidirectional imaging system for an autonomous mobile robot, *Proc. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2005).
- 8) Mashita, T., Iwai, Y. and Yachida, M.: Calibration method for misaligned catadioptric camera, *Proc. 6th Workshop on Omnidirectional Vision* (2005).
- 9) Micusik, B. and Pajdla, T.: Autocalibration and 3d reconstruction with non-central catadioptric cameras, *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.1, pp.58–65 (2004).
- 10) Nayar, S.: Catadioptric omnidirectional camera, *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.482–488 (1997).
- 11) Open Source Computer Vision Library. <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>
- 12) Pless, R.: Using many cameras as one, *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp.587–593 (2003).
- 13) Strelow, D., Mishler, J., Koes, D. and Singh, S.: Precise omnidirectional camera calibration, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.1, pp.689–694 (2001).
- 14) Sturm, P. and Ramalingam, S.: A generic camera calibration concept, *Proc. European Conference on Computer Vision*, Vol.2, pp.1–13 (2004).
- 15) Svoboda, T. and Pajdla, T.: Epipolar geometry for central catadioptric cameras, *International Journal of Computer Vision*, Vol.49, No.1, pp.23–37 (2002).
- 16) Swaminathan, R., Grossberg, M. and Nayar, S.: Caustics of catadioptric camera, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.2, pp.2–9 (2001).
- 17) Yamazawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M.: Obstacle detection with omnidirectional image sensor hyperomni vision, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1062–1067 (1995).
- 18) Ying, X. and Hu, Z.: Catadioptric camera calibration using geometric invariants, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.26, No.10, pp.1260–1271 (2004).

(平成 18 年 9 月 12 日受付)

(平成 19 年 3 月 20 日採録)

(担当編集委員 橋本 学)





青木 伸也

1989年大阪府立大学工学部航空工学科卒業。1991年大阪府立大学大学院博士前期課程航空宇宙工学専攻修了。1995年大阪府立大学大学院博士後期課程航空宇宙工学専攻を単位取得退学。同年～2003年近畿大学生物理工学部機械制御工学科助手。2003年4月より学科名が知能システム工学科に変更。2004年4月より同大学講師。コンピュータビジョンとロボットによる物体ハンドリングの研究に従事。修士(工学)。計測自動制御学会、日本航空宇宙学会各会員。



越後 富夫(正会員)

1980年大阪府立大学工学部電気工学科卒業。1982年大阪府立大学大学院修士課程修了。2003年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1982年日本アイ・ピー・エム(株)入社。同社東京基礎研究所においてロボットビジョン、知能映像メディアの研究に従事。2003年大阪大学客員教授。2006年大阪電気通信大学情報通信工学部情報工学科教授。医用画像処理、映像検索の研究に従事。電子情報通信学会、日本ロボット学会各会員。



佐川 立昌(正会員)

1998年京都大学工学部情報工学科卒業。2000年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程修了。2003年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て2007年4月より同大学助教授。実時間視覚処理と物体のモデリングの研究に従事。博士(工学)。日本ロボット学会、電子情報通信学会、IEEE各会員。



八木 康史(正会員)

1983年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985年大阪大学大学院修士課程修了。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年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年より同大学産業科学研究所教授。1995～1996年英オックスフォード大学客員研究員、2002年仏ピカルディー大学招聘助教授、全方位視覚センシング、画像理解、知能ロボットに関する研究に従事。1996年度電子情報通信学会論文賞、2003年ACM VRST2003 Honorable Mention Award、IEEE、電子情報通信学会、日本ロボット学会各会員。博士(工学)。



向川 康博(正会員)

1997年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年～2002年岡山大学助手。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、複合現実感の研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会、日本バーチャルリアリティ学会、IEEE各会員。