

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 (近畿大学), 榎原 靖, 佐川立昌, 向川康博, 越後富夫, 八木康史 (阪大)

本論文では, 反射屈折撮像系を校正するために, それに含まれる鏡面の位置姿勢を計測する手法について述べる. 反射屈折撮像系の校正はさまざま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, 単一視点を持つ反射屈折光学系についていくつかの手法が提案されてきたが, 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と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ことにより, 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と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 (Kinki University), Yasushi Makihara, Ryusuke Sagawa,
Yasuhiro Mukaigawa, Tomio Echigo, Yasushi Yagi (Osaka University)

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さまざまな分野で幅広く用いられている [10, 17, 15].

反射屈折光学系は, 大きく分けて単一視点系と非単

一視点系の二つに分類される. 前者は単一の視点を持ち, 後者は複数の視点を持つ.

単一視点の反射屈折光学系は, 得られた画像を透視射影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. 例えば, 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. 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^[2,5,7,6].

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に対して、いくつかの校正手法が提案されている。Geyer と Daniilidis^[3]は、3本の直線を用いて焦点距離や鏡面中心位置を求めた。Ying と Hu^[18]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、非単一視点の反射屈折光学系の校正のためにも、いくつかの手法が提案されている。Aliaga^[1]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^[13]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。Micus'ik と Pajdla^[9]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^[8]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、これらの手法は全て、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^[16]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) 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 と Nayar^[4]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 と Ramalingam^[14]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^[12]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、測定値の誤差は全てのパラメータの推定誤差に影響を与える。

本論文では、我々は反射屈折光学系の校正において、鏡面の位置姿勢推定に注目する。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 (焦点距離, 主点位置など) は既知とする。
- ・鏡面の形状は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。

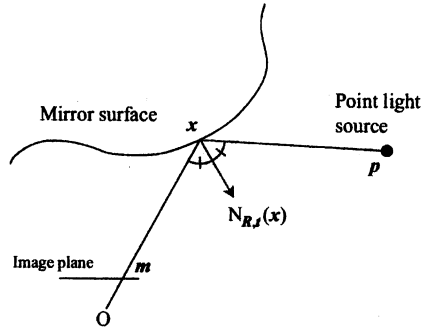


図1 点光源から反射屈折撮像系への射影

世界座標系への変換を除外するために、我々の手法では平行光源を校正に用いる。平行光源は無窮遠にある点光源から照射されたものとみなされるため、光源から撮像系への座標変換を考慮する必要がない。

第2節では、点光源および平行光源を用いた場合の照明条件の違いについて述べる。第3節では、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。第4節では、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。第5節では本論文をまとめる。

2. 射影の幾何学

本節では、点光源による照明と平行光源による照明の差異について述べる。

2.1. 点光源からの射影

撮像系において物体あるいは特徴点が射影されるとき、それは有限の距離にある点光源からの射影と見なされる。したがって、校正に用いられる物体は、通常は点光源と考えられる。図1は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。(1)式からスケール係数を除く

ことにより、二つの方程式が得られる。

未知パラメータに関して、次の3通りのケースが考えられる。

1. 全ての点の3次元位置が未知である場合
2. 点同士の3次元空間中における相対位置は既知であるが、カメラと点との相対位置は未知である場合
3. カメラと点の相対位置が既知である場合

最初のケースは、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時、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、推定しなければならないパラメータの個数は極めて大きい。

2番目のケースは、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大きい。

3番目のケースは、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 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よくない。

2.2. 平行光源からの射影

次に、平行光源からの射影を用いることにより、推定すべき未知パラメータの個数を減らせることを示す。

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

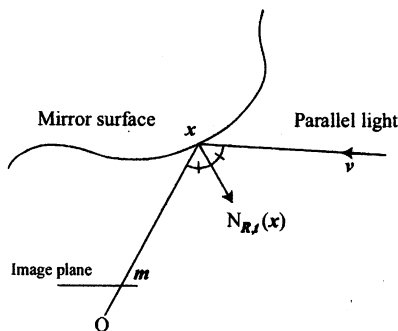


図2 平行光源から反射屈折撮像系への射影

ある。平行光が無遠慮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。

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

ここで、 $N_{R,t}(x)$ は反射点 x における鏡面の法線ベクトル、 R と t は鏡面の回転および平行移動パラメータ、 a はスケール係数である。(1)式と同様にスケール係数を除去すると、二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わかる。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。平行光源同士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、問題を次の二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小さい。

3. 平行光源を用いた鏡面の位置姿勢校正

本節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。本手法は二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の概念を示す。カメラと鏡を2軸のターンテーブルに搭載し、回転する。二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源を使用する。点光源が放物面鏡の焦点に置かれ、光は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。

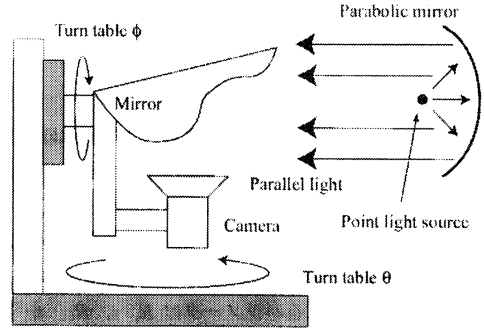


図3 平行光源とターンテーブルを用いた校正システム

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カメラが平行光源の像を取得するとき、回転パラメータが異なるにも関わらず、光像位置が一致するような場合がある。すなわち、2個の回転パラメータ R_{T1} と R_{T2} を考えるとき、 R_{T1} と R_{T2} が等しくないにもかかわらず、光像位置 m_1 と m_2 が等しくなるような場合である。カメラが光源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、カメラ座標系における光線ベクトルは等しい。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光線ベクトル、 R_C はターンテーブルに対する撮像系の相対的な回転である。平行光源によって照射しているため、カメラの回転に伴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 $R_{T1} - R_{T2}$ 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。一組の 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

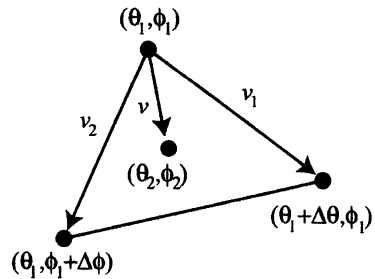


図4 対応する回転パラメータの算出

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、回転パラメータが異なっていて構造位置が一致するものを探す。ターンテーブルの二つの回転軸の回転を表す行列をそれぞれ R_θ 、 R_ϕ とするとき、回転パラメータ 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 (θ_1, ϕ_1) に対応する光像の近くに、回転パラメータ (θ_2, ϕ_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。 (θ_1, ϕ_1) の光像から (θ_2, ϕ_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、 (θ_2, ϕ_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。

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 における光線ベクトル 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、 $n = -v - m / \|m\|$ である。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。

(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(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。

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、カメラ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パラメータ 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ので、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

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]

σ (pixels)	1 pair		6 pairs	
	Mean	Std.	Mean	Std.
1.0	0.47	0.29	0.19	0.11
2.0	1.34	1.61	0.75	0.58
4.0	2.54	3.03	1.22	1.35

よって法線ベクトルを求めることにする。任意の鏡面形状を表現するため、本論文で提案する手法ではメッシュモデルで鏡面形状を近似する。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。提案手法は二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度の視野角をも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 640×480 ピクセルとした。放物面鏡の曲率半径 h は 2.5mm 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 10mm 、高さは 5mm とした。鏡面のメッシュモデルは一辺約 0.05mm 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 $(0.3, -0.6, 18.0)\text{mm}$ 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 $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$ の正規分布ノイズを加えた。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成す角度をとった。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

表 2 鏡面位置姿勢の推定手法の比較

Our 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

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
Method 1	6	4	6	24	0	30	48
Method 2	6	4	6	24	18	48	48

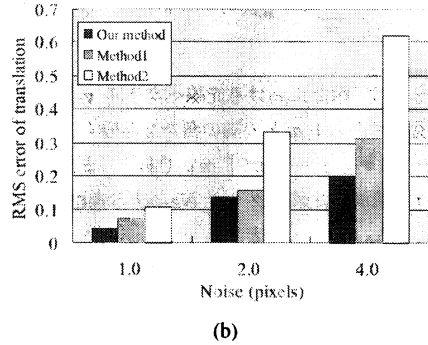
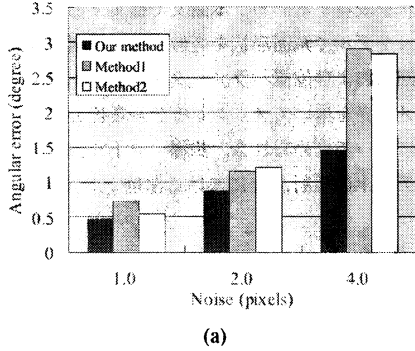


図 5 鏡面位置姿勢の推定誤差の比較

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 640×480 ピクセルの解像度を持つテレセントリックカメラを想定した。鏡面は放物面形状で、曲率半径は 9.0mm、直径は 25.76mm、高さは 9.0mm 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 10.0mm とした。したがって、この反射屈折光学系は単一視点を持っている。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 では点光源それぞれの相対位置は既知であるとするのに対し、手法 2 では点光源間の相対位置も未知とした。そのため、手法 1 は構造化された観測対象を用いた校正手法であり、手法 2 は SFM 手法である。手法 1 と 2 では評価関数(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、 $p' = Rcp + tc$ 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。

以上の条件で生成したシミュレーション画像上の画像位置に正規分布ノイズを加えたものを元に、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 σ は 1.0, 2.0, 4.0 [pixels] の 3 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ノイズを加えた。ノイズの強度には、表 1 で 6 組の光像から推定した光線ベクトルの誤差を使った。

各手法による鏡面の位置姿勢計測誤差を図 5 に示す。姿勢計測の精度の評価には、放物面鏡の中心軸の傾斜角度の、真値と推定値の差を用いた (図 5(a))。位置計測の精度の評価には、位置の真値と推定値の RMS 誤差を用いた (図 5(b))。それぞれの結果について、提案手法はその他の手法に比べて精度が優れていた。

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 6 (a))。カメラと鏡面から構成される撮像系がタ

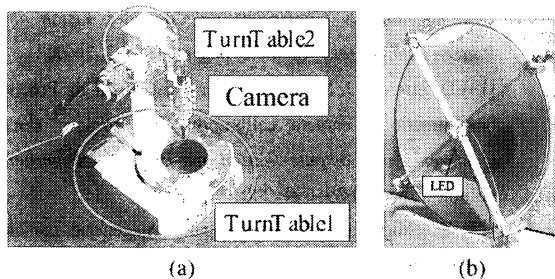


図6 実験装置

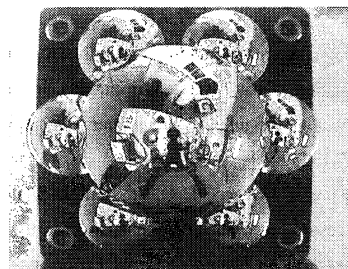


図7 複合放物面鏡

表3 鏡面位置の推定結果 (x軸方向, y軸方向, z軸方向) [mm]

Estimated Position: カメラからの相対位置, Relative Position: 中央鏡からの相対位置

Measured Position: 手工具による測定値, Difference: 推定結果と測定値の差

Mirror	Estimated Position	Relative Position	Measured Position	Difference
Center	(0.38, -1.84, 48.49)	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	N.A
Side1	(-6.81, 15.4, 56.83)	(-7.19, 13.56, 8.34)	(-7.6, 13.1, 9)	(0.41, 0.46, -0.66)
Side2	(-14.24, 2.05, 56.68)	(-14.62, 0.21, 8.19)	(-15.1, 0, 9)	(0.48, 0.21, -0.81)
Side3	(-6.66, -12.19, 56.93)	(-7.04, -14.03, 8.44)	(-7.6, -13.1, 9)	(0.56, -0.93, -0.56)
Side4	(7.83, -12.28, 55.92)	(7.45, -14.12, 7.43)	(7.6, -13.1, 9)	(-0.15, -1.02, -1.57)
Side5	(14.93, 1.31, 56.93)	(14.55, -0.53, 8.44)	(15.1, 0, 9)	(-0.55, -0.53, -0.56)
Side6	(7.89, 14.53, 55.44)	(7.51, 12.69, 6.95)	(7.6, 13.1, 9)	(-0.09, -0.41, -2.05)

ーンテーブルに搭載される。また、平行光源として、放物面鏡とLEDを用いた照明装置を製作した(図6(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、それぞれの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^[6]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を例を図7に示す。このシステムは7個の放物面鏡とパースペクティブカメラを使用している。カメラの視野角は約38度であり、カメラの内部パラメータはOpenCV^[11]を用いて求めた。鏡面の曲率半径は、中央鏡で9.0mm、側部鏡で4.5mmである。直径と高さは、中央鏡で25.76mmと9.0mm、側部鏡では13.0mmと4.5mmである。

鏡面位置の推定結果を表3に示す。カメラに対する鏡面の位置は測定が困難なため、ここでは中央鏡に対する側部鏡の相対位置について評価する。評価の基準については、複合放物面鏡を手工具で計測した測定値を用いた。

側部鏡の一部は中央鏡の影に入ってしまうため、平行光源の照射が届かず、光像が得られない領域が生じる。そのためにシミュレーション結果よりも誤差が大

きくなったものと考えられる。しかしながら、誤差は概ね1mm以内に収まっていることから、提案手法によって鏡面位置を推定することができたものと考えられる。

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、提案手法の精度を実証した。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挙げられる。

参考文献

- [1] D. Aliaga. Accurate catadioptric calibration for realtime pose estimation of room-size environments. In *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 1, pages 127–134, 2001.
- [2] J. Gaspar, C. Decco, J. O. Jr., and J. Santos-Victor. Constant resolution omnidirectional cameras. In *Proc. the Third Workshop on Omnidirectional Vision*, pages 27–34, 2002.
- [3] C. Geyer and K. Daniilidis. Paracatadioptric camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 24(5):687–695, May 2002.
- [4] M. Grossberg and S. Nayar. A general imaging model and a method for finding its parameters. In *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 108–115, 2001.
- [5] R. Hicks and R. Perline. Equi-areal catadioptric sensors. In *Proc. the Third Workshop on Omnidirectional Vision*, pages 13–18, 2002.
- [6] Y. Kojima, R. Sagawa, T. Echigo, and Y. Yagi. Calibration and performance evaluation of omnidirectional sensor with compound spherical mirrors. In *Proc. The 6th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Nonclassical cameras*. 2005.
- [7] K. Kondo, Y. Yagi, and M. Yachida. Non-isotropic omnidirectional imaging system for an autonomous mobile robot. In *Proc. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, April 18–22 2005.
- [8] T. Mashita, Y. Iwai, and M. Yachida. Calibration method for misaligned catadioptric camera. In *Proc. the Sixth Workshop on Omnidirectional Vision*, 2005.
- [9] B. Micusík and T. Pajdla. Autocalibration and 3d reconstruction with non-central catadioptric cameras. In *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 1, pages 58–65, Washington US. June 2004.
- [10] S. Nayar. Catadioptric omnidirectional camera. In *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 482–488, 1997.
- [11] Open Source Computer Vision Library. <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>.
- [12] R. Pless. Using many cameras as one. In *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 587–593, 2003.
- [13] D. Strelow, J. Mishler, D. Koes, and S. Singh. Precise omnidirectional camera calibration. In *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 1, pages 689–694, 2001.
- [14] P. Sturm and S. Ramalingam. A generic camera calibration concept. In *Proc. European Conference on Computer Vision*. volume 2, pages 1–13, Prague, Czech. May 2004.
- [15] T. Svoboda and T. Pajdla. Epipolar geometry for central catadioptric cameras. *International Journal of Computer Vision*, 49(1):23–37, August 2002.
- [16] R. Swaminathan, M. Grossberg, and S. Nayar. Caustics of catadioptric camera. In *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 2–9, 2001.
- [17] K. Yamazawa, Y. Yagi, and M. Yachida. Obstacle detection with omnidirectional image sensor hyperomni vision. In *IEEE the International Conference on Robotics and Automation*. pages 1062 – 1067. Nagoya, May 1995.
- [18] X. Ying and Z. Hu. Catadioptric camera calibration using geometric invariants. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(10):1260–1271, 2004.