



Title	平行光源を用いた既知形状鏡面の位置姿勢計測
Author(s)	青木, 伸也
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/403
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

平行光源を用いた既知形状鏡面の位置姿勢計測

2010年1月

青木 伸也

平行光源を用いた既知形状鏡面の位置姿勢計測

提出先 大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月 2010年1月

青木 伸也

研究発表リスト

本論文に関する研究発表

論文

[1] 青木伸也, 佐川立昌, 八木康史: 平行光ペアの観測による反射屈折光学撮像系における鏡の位置姿勢推定, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J92-D, No.5, pp.661-670, 2009年5月.

[2] 青木伸也, 佐川立昌, 向川康博, 越後富夫, 八木康史: 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, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.48, No.SIG9 (CVIM18), pp.115-123, 2007年6月.

国際会議発表

(*は登壇者)

[1] *Ryusuke Sagawa, Nobuya Aoki, Yasushi Yagi: Mirror Localization for Catadioptric Imaging System by Observing Parallel Light Pairs, In Proc. 8th Asian Conference on Computer Vision, pp.116-126, Tokyo, Japan, Nov. 18-22, 2007.

[2] *Ryusuke Sagawa, Nobuya Aoki, Yasuhiro Mukaigawa, Tomio Echigo, Yasushi Yagi: Mirror Localization for a Catadioptric Imaging System by Projecting Parallel Lights, In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3957-3962, Rome, Italy, April 10-14, 2007.

学会発表

(*は登壇者)

[1] *中森雄哉, 青木伸也, 佐川立昌, 越後富夫, 八木康史: 平行光間の角度不変性に基づく反射屈折撮像系のミラー位置姿勢校正, 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, no.2006-CVIM-154, pp.9-14, 奈良, 5月, 2006年.

[2] *青木伸也, 榎原靖, 佐川立昌, 向川康博, 越後富夫, 八木康史: 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, 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, No. 2006-CVIM-152, pp.23-30, 大阪, 1月, 2006年.

その他の研究発表

論文

[1] 稲荷隆彦, 青木伸也: 2方向からのハイライト像による円柱物体の三次元ビジョンシステム, 電気学会論文誌C, 119-C巻, 11号, pp.1398-1404, 1999年11月.

国際会議発表

(*は登壇者)

[1] *Takahiko INARI, Nobuya AOKI: A Proximity Sensor Using Power Variation of a Laser Diode Caused by Returned Light and Its Characteristics of Stability, Proc. of IECON 2005 (Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society), 2005.

[2] *Nobuya AOKI, Hiroki NISHIKAWA, Atsuto YOSHIDA, Takahiko INARI: Extension of 3D Vision System for Spherical Objects using Highlight Patterns, Proc. of SICE Annual Conference 2004, pp.2322-2325, 2004.

[3] *Nobuya AOKI, Takahiko INARI: 3D Vision System with Two Cameras using Highlight Patterns for Cylindrical Targets, Proc. of 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Vol.1, pp.601-604, 2002.

[4] *Takahiko INARI, Nobuya AOKI: Surface Roughness Measurement by Optical Pattern Projection Method Using Image Processing with TV Camera, XV IMEKO (International Measurement Confederation) World Congress Vol.IX, pp.71-76, 1999.

[5] *Nobuya AOKI, Takahiko INARI: Detection of Leaked Oil Using Image Processing, Proceeding of the 1997 IECON (International Conf. Industrial Electronics, Control, and Instrumentation), pp.1470-1473, 1997.

[6] Tsumura, Okubo, Komatsu, *Aoki, Sugihara: Data Communication System Using Laser and Corner Cubes, Proceedings of the Intelligent Vehicles '93 Symposium, pp.366, 1993.

[7] *Tsumura, Okubo, Komatsu, Aoki: A Proposed Automobile Communication and Traffic Control System Using Laser and Corner Cubes, Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp.154, 1992.

学会発表

(*は登壇者)

[1] *稲荷隆彦, 笠井佳堯, 青木伸也: 点検ロボット用視覚システムの露光制御研究, 平成 17 年電気学会全国大会講演論文集, 3 月, 2005 年 .

[2] *稲荷隆彦, 青木伸也: 三角測量式レーザ距離センサの光学的条件による精度への影響, 第 47 回自動制御連合講演会講演論文集, 11 月, 2004 年 .

[3] *稲荷隆彦, 河村毅, 青木伸也: 目視検査等におけるテンプレートマッチングの出力表示方式, 平成 16 年電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集, 9 月, 2004 年

[4] 稲荷隆彦, 青木伸也: 半導体レーザの反射戻り光を用いた距離センサの安定性, 第 46 回自動制御連合講演会講演論文集, pp.310-312, 2003 年 .

[5] 稲荷隆彦, 青木伸也: レーザ光反射像分布を用いた表面性状の計測, 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.780-783, 2003 年 .

[6] *N. AOKI, H.YAMAUCHI, T. INARI: 3D Vision System for Spherical Objects using Highlight Patterns, Proc. of SICE Annual Conf. 2003, MPIO-4-1, 2003.

[7] *Nobuya Aoki, Akifumi Misaka, Masayuki Miyaoka, Takahiko Inari: 3D Vision System for Cylindrical Objects Using Highlight Patterns Produced by 2 Point Light Sources at Once, Proc. of SICE Annual Conf. 2002, TA03-4, 2002.

[8] *青木伸也, 稲荷隆彦: 位置計測用カメラの主点の決定方法, 第 40 回計測自動制御学会学術講演会予行集, 102C-5, 2001 年 7 月 .

[9] *青木伸也, 稲荷隆彦: 2 台のレーザスキャナを用いた移動体の三次元位置姿勢計測 (第 2 報), 第 39 回計測自動制御学会学術講演会予行

集, 301A-4, 2000年7月.

[10] *稲荷隆彦, 増田有作, 青木伸也: 半導体レーザの反射戻り光を用いた近接センサ, 第44回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.75-76, 2000年5月.

[11] *稲荷隆彦, 青木伸也: 光反射型計測装置のための半導体レーザ出力制御, 電気学会全国大会講演論文集, 第4集, pp.1665-1666, 2000年3月.

[12] *青木伸也, 稲荷隆彦: 2台のレーザスキャナを用いた移動体の三次元位置姿勢計測, 第38回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.147-148, 1999年7月.

[13] *北川美智也, 青木伸也, 稲荷隆彦: ヒストグラム平均化による画像の強調, 第43回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.279-280, 1999年5月.

[14] *稲荷隆弘, 稲葉好啓, 青木伸也: 三角測量式距離センサにおける半導体レーザの出力制御, 第43回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.293-294, 1999年5月.

[15] *稲荷隆弘, 青木伸也, 宮崎博州, 西野寿樹, 弘田利光: 2台のテレビカメラと点光源によるハイライトパターンを用いた円筒形物体の三次元ビジョンシステム, 第37回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.195-196, 1998年7月

[16] *青木伸也, 津村俊弘, 小松信雄, 稲荷隆彦: 単一レーザ光源とコーナキューブを用いた移動体双方向通信システム, 電気学会計測研究会資料, IM-96-44, pp.47-50, 1996年7月24日.

[17] 津村, 大久保, 小松, *杉原, 青木: コーナーキューブにおける減衰全反射を用いた光強度変調の高速化について, 電子情報通信学会信学技報, pp.111, 1995年.

[18] 津村, 大久保, 小松, 青木, *杉原: 双方向空間光通信のためのコーナキューブにおける減衰全反射を用いた光強度変調, 第37回自動制御連合講演会前刷集, pp.405, 1994年.

[19] 津村, 大久保, 小松, *青木: レーザを用いたUAVの自動着陸システムについて, 第32回飛行機シンポジウム講演集, pp.501, 1994年.

[20] 津村, 大久保, 小松, *青木, 杉原, 奥村: レーザ光線とコーナキューブを用いた複数移動体位置計測・通信システム, 第7回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp.64, 1994年.

[21] 津村, 大久保, 小松, *青木, 杉原, 奥村: 複数移動体のための双方

向光空間通信，第7回アドバンティシンプोजウム前刷集，pp.13，1994年

[22] 津村，大久保，*小松，青木：複数移動体の為のレーザとコーナキューブを用いた光通信システム，第11回日本ロボット学会学術講演会前刷集，pp.885，1993年

[23] 津村，大久保，小松，青木，*杉原：コーナキューブと圧電素子を用いたレーザ利用による移動体通信，第37回システム情報制御学会研究発表講演会前刷集，pp.335，1993年

[24] 津村，大久保，小松，*青木，杉原：レーザ光線とコーナキューブを用いた双方向通信システム，電子情報通信学会信学技報，pp.41，1993年

[25] 津村，小松，*青木，川本：レーザ光線と再帰反射板を用いた距離・角度計測手法，日本航空宇宙学会第28回飛行機シンポジウム講演集，pp.488，1990年．

[26] *青木，津村，小松，二羽：レーザ光線と再帰反射板を用いた距離・角度計測装置，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'90講演論文集，pp.337，1990年．

目次

第1章	序論	9
1.1	研究の背景と関連分野の研究状況	9
1.2	本研究の目的と概要	11
第2章	反射光像に基づく鏡面のパラメータ推定	13
2.1	撮像系の校正と光源	13
2.2	撮像系における射影とパラメータ推定	14
2.3	一般の光源を用いた鏡面の位置・姿勢推定	15
2.4	平行光を用いた鏡面の位置・姿勢推定	17
第3章	平行光源と撮像系の回転角を用いる鏡面の位置姿勢計測	21
3.1	手法	21
3.1.1	平行光源の方向の推定	22
3.1.2	鏡面の位置姿勢の推定	24
3.2	実験による精度評価	25
3.2.1	シミュレーションによる精度評価	25
3.2.2	実画像を用いた位置姿勢推定	30
第4章	平行光源のペアを用いた鏡面の位置姿勢計測	33
4.1	平行光ペアの射影	33
4.2	平行光ペアを用いた鏡の位置姿勢推定手法	34
4.2.1	相対角誤差の最小化による鏡の位置姿勢の推定	34
4.2.2	入射光ベクトルの計算	36
4.2.3	平行光ペアの生成	36
4.3	実験による精度評価	38
4.3.1	シミュレーションによる精度評価	38
4.3.2	実画像を用いた鏡の位置姿勢推定	45
第5章	結論	51

8

謝辞

53

参考文献

54

付録

59

第1章 序論

1.1 研究の背景と関連分野の研究状況

視覚システムの様々な応用において、目的を達成するために特殊な視野範囲を持つ視覚システムを利用することが適している場合がある。例えば、全方位視覚システム [1, 2, 3] は様々な応用に用いられている。特殊な視野範囲を得るための方法として、反射屈折撮像系がしばしば用いられている。反射屈折撮像系は、鏡面での光線反射をカメラで観測する撮像系である。図 1.1 は反射屈折撮像系の概念を示す。反射屈折撮像系は、異なる形状の鏡を用いることによって、様々な視野を簡単に得ることができる。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 [4]。

反射屈折撮像系を用いて撮影画像の幾何的な解析を行うためには、カメラと鏡面の相対位置など、撮像系のパラメータを校正する必要がある。

反射屈折撮像系は単一視点系か非単一視点系に分けられる。単一視点反射屈折撮像系は、取得した画像を透視投影画像に変換できるという利点を持つが、鏡の形状と位置に強い条件が課される。例えば、放物面鏡の場合には、テレセントリックカメラと共に用いる必要があり、さらにカメラと鏡の光軸が平行である必要がある。カメラと鏡の位置が合っていない場合には、単一視点とならない。そこで、より自由な視野を得るために、様々な応用に対して、非単一視点光学系の利用 [5, 6, 7, 8, 9] が提案されている。

単一視点撮像系の校正方法はこれまでいくつかの方法が提案されている。Geyer と Daniilidis [10] は 3 本の直線から焦点距離、鏡の中心などを求める手法を提案し、Ying と Hu [11] は直線や球を用いて校正する手法を提案した。Mei と Rives [12] は、透視投影カメラの校正方法 [13] と同様に、平面マーカを用いてパラメータを求める方法を提案した。しかし、これらの方法では単一視点が仮定されているため、非単一視点系には適

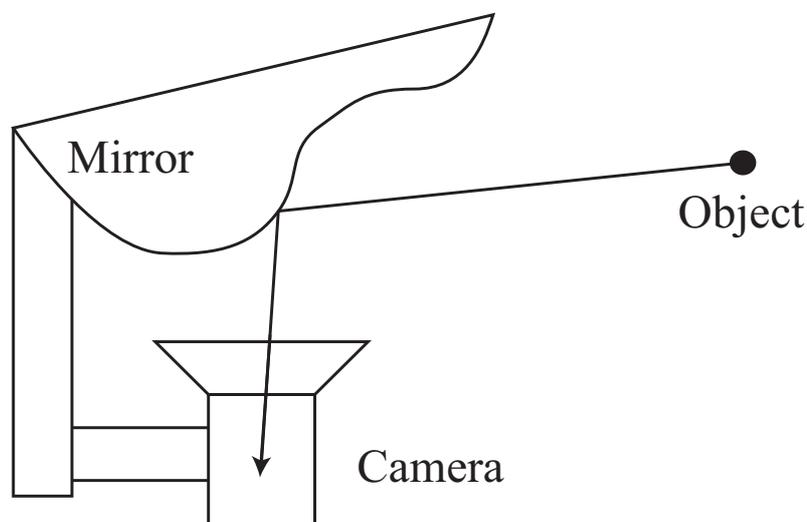


図 1.1: 反射屈折撮像系

用できない。

一方、非単一視点系の校正方法には下記のものがある。Aliaga [14] は既知の3次元点を用いて放物面鏡と透視投影カメラによる反射屈折撮像系のパラメータを求めた。Strelow ら [15] は既知の3次元点を用いて単一視点撮像系からの鏡の位置ずれを求めた。Micusík と Pajdla [16] は画像中の鏡の輪郭に楕円をフィッティングし、非単一視点系を単一視点系に近似することによってパラメータを求めた。Mashita ら [17] は鏡の輪郭を利用し、双曲面鏡の位置ずれを推定した。しかし、これらの方法は全方位反射屈折撮像系に限定した方法である。

より一般的な撮像系を校正する手法も提案されている。Swaminathan ら [18] は、既知のカメラ運動と位置が未知のシーン中の点から鏡の入射光の火面 (caustic surface) を推定し、非単一視点系のパラメータを推定した。Grossberg と Nayar [19] はノンパラメトリックな撮像系モデルである一般化撮像系 (general imaging model) を提案し、各ピクセルあたりの視線ベクトルを2つの平面を観測することによって計算した。Sturm と Ramalingam [20] は未知のカメラ運動と既知形状のマーカから一般化撮像系の校正方法を提案した。しかし、これらの手法は撮像系の内部および外部パラメータを同時に推定するものであるため、撮像系の内部パラメータのみが必要な場合であっても、推定を必要としない外部パラメータによって計測誤差が吸収され、求めるべきパラメータの精度に影響してし

まう．たとえば，撮像系を動かしながら対象物を撮影するような場合，外部パラメータは動きによって変化するものであるから，事前に推定しておく性質のものではない．

1.2 本研究の目的と概要

本研究では，反射屈折撮像系の校正のために，撮像系に含まれる鏡面の位置および姿勢を推定する手法を提案する．提案手法は，撮像系に対して平行光線を照射する光源，すなわち平行光源を使用し，平行光源からの光束の下で撮像系の姿勢を変化させながら平行光源を観測することによって，鏡面の位置・姿勢を推定する．

撮像系から観測される平行光源の光像位置は，撮像系が平行移動しても不変であるという特徴を持つ．このため，校正において推定に現れる未知パラメータから，撮像系の平行移動成分を除くことが出来る．そのため提案手法では，平行光源でない特徴点を使用する従来手法に比べ，推定に現れる未知パラメータの個数を減少させることが出来る．これにより，本来は推定する必要がない未知パラメータに含まれる誤差の影響が除かれ，求めたい鏡面の位置・姿勢の推定精度が向上する．

反射屈折撮像系の校正に関する既存の手法では，鏡の位置と形状に強い仮定をしているものもあるが，提案手法は鏡の位置・形状を限定しない手法である．ただし鏡面の形状は既知であるものと仮定する．それ以外については次のように仮定する：

- カメラの焦点距離や主点位置などの内部パラメータは既知とする．
- 世界座標系への変換は校正から除外する．

第2章ではまず，反射屈折撮像系において，系の外部に置いた特徴点を撮像して，その情報から鏡面のパラメータを得る方法を定式化する．特徴点から出た光線が鏡面で反射してカメラに入射する際に，鏡面上で光線が正反射することを拘束条件として，未知パラメータを含むコスト関数を作り，これを最小化するパラメータを探索する事により，未知パラメータを推定する．

続いて特別な場合として，特徴点として平行光源を用いた場合について定式化し，その場合には推定すべきパラメータ数が減少するため，推定精度の向上が期待できることを示す．平行光線の下で撮像系が平行移

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応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。

第3章と第4章では、反射屈折撮像系に含まれる鏡面の具体的な校正手法について提案する。

第3章では撮像系を一つの平行光源の下にある2軸ターンテーブルに搭載し、撮像系を回転させながら平行光源を撮像し、得られた光像およびターンテーブルの回転角データに基づいて、鏡面の位置・姿勢を求める手法について述べる。

それに対して第4章では、二つの平行光源に同時に照射される位置で撮像系を自由に回転させ、そこで得られた光像に基づいて、鏡面の位置・姿勢を求める手法について述べる。この手法では、撮像系がどのような姿勢になったときも、撮像系から観測される二つの平行光源からの光線ベクトルの相対角度は不変であることを拘束条件として、未知パラメータの推定を行う。二つの平行光源からの光線ベクトルの相対角度は、既知であっても未知であってもよい。

前者の手法では撮像系の姿勢角としてターンテーブルの正確な回転角が使用できる。一方後者の方法ではターンテーブルが不要で、平行光線の照射下で撮像系を自由に回転させるだけでよいため、校正のための装置が簡単になるという利点がある。

それぞれの章において、まず校正手法の定式化を行い、続いてシミュレーション実験による精度評価と、実験装置で得られた実画像を用いた精度評価実験について述べる。

第5章では、結論として、本研究で得られた成果についてまとめる。

第2章 反射光像に基づく鏡面の パラメータ推定

本章では、対象となる鏡面の位置・姿勢などのパラメータを推定するために、その鏡面を含む反射屈折撮像系を構成し、三次元空間内に置かれた特徴点を撮像して、その反射光像を用いて未知パラメータの推定を行う手法について述べる。また、特徴点として平行光線を放射する光源を用いると、求めたい未知パラメータの推定精度を向上できる場合があることを示す。

2.1 撮像系の校正と光源

一般に、撮像系の構成要素に含まれる未知パラメータを求める操作を、その撮像系の校正という。撮像系の校正は通常、3次元空間中の物体上の特徴点を撮像し、その撮像点に関する得られている情報と、撮像面上に観測される特徴点の座標を用いて、撮像系の未知パラメータを推定する。

撮像系の校正のために物体を撮像すると、物体上の特徴点からの光が撮像系に到達し、撮像される。特徴点からの光は、特徴点自体が発光する光源になっている場合と、別の光源から放射された光が特徴点で反射して撮像系に向かう場合が考えられるが、校正に使用する上では特に区別する必要はないので、以降では自ら発光しているかどうかにかかわらず、物体上の特徴点のことを光源と呼ぶことにする。

光源を出た光は、撮像系に到達するまで3次元空間中を直進するものと仮定する。すなわち、光の伝播経路上での屈折などは、本稿では考慮しないものとする。

2.2 撮像系における射影とパラメータ推定

3次元空間内に世界座標系を考え、その中に撮像系と光源が配置されているものとする。撮像系は世界座標系の中で平行移動および回転するが、撮像系内部の構成要素間の関係は不変であるものとする。また、撮像系に対して固定されたカメラ座標系を設けるものとする。

光源から出た光が、撮像系に入射するときの入射方向を、その光の光線ベクトルと呼ぶことにする。カメラ座標系における入射光の光線ベクトルの表現は、一般的には世界座標系における撮像系の位置と姿勢、および光源の位置によって定まる。世界座標系における撮像系の位置ベクトルを t_C 、撮像系の姿勢を表す回転行列を R_C 、光源の位置ベクトルを p とすると、カメラ座標系における入射光の光線ベクトルの表現 v は、 t_C 、 R_C 、 p の関数となる。すなわち、

$$v = v(t_C, R_C, p) \quad (2.1)$$

t_C 、 R_C 、 p を撮像系の外部パラメータと呼ぶことにする。これに対して、撮像系を構成する要素のパラメータをその撮像系の内部パラメータと呼ぶことにする。撮像系の内部パラメータが固定されている状態で光源を撮影すると、その像の像面上での座標は、カメラ座標系における入射光の光線ベクトル v によって定まる。入射光像の像面上での座標を m とすると、 v と m はある射影関数 F によって、次式のような射影方程式が書ける。

$$m = F(v) = F(v(t_C, R_C, p)) \quad (2.2)$$

この射影関数 F は撮像系内部のパラメータを含む。

撮像系内部および外部の未知パラメータを求めるには、まず3次元空間内に配置された光源を撮像系で観測し、像面上での座標を得る。続いて、パラメータの推定値を用いて像面上に再投影される像の座標を求め、これと実際の像の座標との誤差を最小化するようにパラメータを修正することによって、未知パラメータを推定することができる。最小化すべきコスト関数 E は次式のようになる。

$$E = \sum_i \| F(v(t_C, R_C, p_i)) - m_i \|^2 \quad (2.3)$$

この E を最小化する未知パラメータを探索することにより、未知パラメータが推定される。

撮像系の内部パラメータは、撮像系を幾何学的な解析に使用する上で重要なパラメータであるが、外部パラメータは必要ではない場合がある。たとえば、撮像系を動かしながら対象物を撮影するような場合、外部パラメータは動きによって変化するものであるから、事前に推定しておく性質のものではない。

内部パラメータだけが必要であっても、コスト関数 E を最小化する未知パラメータの探索を行うと、内部パラメータの推定結果の精度は外部パラメータの推定結果の精度に依存することになる。したがって、内部パラメータだけが必要となる場合は、同時に推定する外部パラメータの数はなるべく少ないほうが精度的に有利である。

2.3 一般の光源を用いた鏡面の位置・姿勢推定

反射屈折撮像系とは、系の内部に鏡面を含む撮像系である。通常形式のカメラに反射鏡を付加して構成される反射屈折撮像系では、カメラを基準とした反射鏡のパラメータ（位置・姿勢・形状など）を、校正操作を行って求める必要がある。

これを応用して、反射屈折撮像系を構成するものではない鏡面に対しても、その鏡面に対してカメラを設置し、カメラと鏡面の組を反射屈折撮像系と見なせば、同様の校正手法を用いて、対象となる鏡面のパラメータを求めることが出来る。

以降では、鏡面の形状は既知であるものと仮定し、鏡面の位置および姿勢を求める校正を考える。

図 2.1 は鏡面とカメラを組み合わせた反射屈折光学系に、外部の点光源からの光が入射して撮像される様子を示す。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。

$$\frac{p-x}{\|p-x\|} - \frac{m}{\|m\|} = aN_{R,t}(x) \quad (2.4)$$

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 はそれぞれ鏡面の姿勢と位置を表し、 a はスケール係数である。ベクトル $p-x$ は点 x に入射する光線ベクトルのちょうど逆向きであるから、規格化された入射光線ベクトルを v とすると、次式のように書ける。

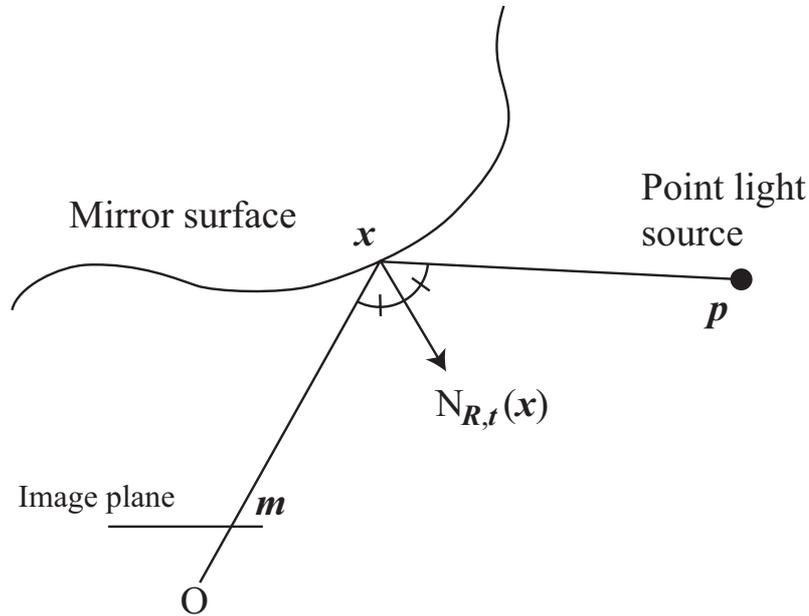


図 2.1: 点光源から反射屈折撮像系への射影

$$-v - \frac{m}{\|m\|} = aN_{R,t}(x) \quad (2.5)$$

式 (2.5) からスケール係数を除くことにより，入射光の像位置 m に関する射影方程式が得られる．鏡面の形状は既知であるものとしたので，反射点 x における法線ベクトル $N_{R,t}(x)$ は，カメラ座標系における鏡面の位置 t と姿勢 R によって決まる．また，点 x への入射光の光線ベクトルは，式 (2.1) で示したように，一般には撮像系の外部パラメータ t_C, R_C, p によって決まる．よって式 (2.2) の射影関数 F は， t, R, t_C, R_C および p の関数であるといえる．したがって，式 (2.3) の評価関数 E を最小化する未知パラメータを探索することにより，鏡面の位置と姿勢を求めることが出来る．

射影関数 F の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．

- 撮影される全ての特徴点の3次元位置が未知である場合
- 特徴点同士の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成しているが，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)

- カメラと全ての特徴点の相対位置が既知である場合

最初の場合は，カメラと3次元点の位置を同時に推定するSFM(shape-from-motion)手法に対応する．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極めて多い．

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によって変化する．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 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．

2.4 平行光を用いた鏡面の位置・姿勢推定

本節では，前節で述べた一般の点光源に代えて，平行光を放射する光源を用いて鏡面の位置・姿勢推定を行うことを考える．

平行光とは，太陽光のように平行な光線ベクトルの束として表される光である．また，無限遠方と見なせる位置にある点光源からの光線も，平行光と見なせる．平行光に照射される撮像系から光源を観測すると，カ

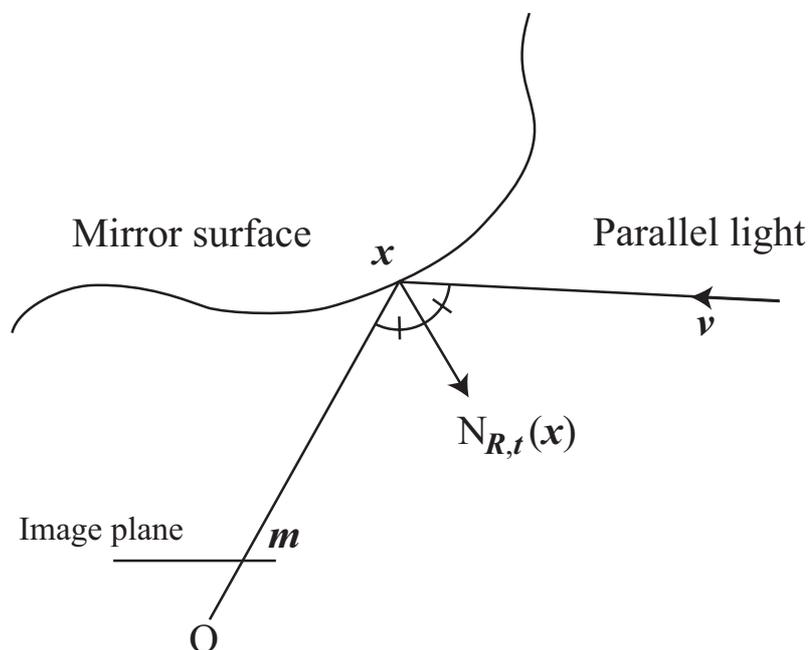


図 2.2: 平行光源から反射屈折撮像系への射影

メラ座標系における光線ベクトルの表現は，世界座標系における撮像系の位置には依存せず，世界座標系における光線ベクトル，および世界座標系における撮像系の姿勢によって決まる．このため，推定に現れる未知パラメータの個数を減らすことができ，それによって推定精度の向上を期待することが出来る．

図 2.2 は平行光源からの射影を示す．図 2.1 との違いは，光源がカメラ座標系における方向ベクトルの表現 v を持つ平行光になっている点である．鏡面での反射に関する方程式は次のようになる．

$$-v - \frac{m}{\|m\|} = aN_{R,t}(x) \quad (2.6)$$

上式は式 (2.5) と同形であるが，入射光の光線ベクトル v が世界座標系における光線ベクトルと撮像系の姿勢 R_C の関数となっているため，式 (2.2) の射影関数 F は， t, R, R_C ，および世界座標系における光線ベクトルとなる．前節と同様に式 (2.3) の評価関数 E を最小化する未知パラメータを探索することにより，鏡面の位置と姿勢を求めることが出来る．

世界座標系における光線ベクトルは2個のパラメータで構成される．そ

のため，撮像系の姿勢を回転させて k 枚の画像を取得し， n 個の異なる平行光を観測するとき，未知パラメータの個数は $6 + 3k + 2n$ 個となる．

さらに次節以降では，撮像系全体をターンテーブルで回転させる（第3章）あるいは平行光のペアを使用する（第4章）という方法を用いて，推定に現れる未知な外部パラメータ数を減少させ，それによって求めたい内部パラメータの推定精度を向上させる手法について述べる．

第3章 平行光源と撮像系の回転角を用いる鏡面の位置姿勢計測

本章では，反射屈折撮像系に含まれる鏡面の位置および姿勢パラメータを校正するため，撮像系を一つの平行光源の下にある2軸ターンテーブルに搭載し，撮像系を回転させながら平行光源を撮像し，得られた光像およびターンテーブルの回転角データに基づいて校正を行う手法について述べる．

第2章で述べた原理に基づき，平行光源を外部特徴点として使用するため，撮像系の平行移動に対応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，その結果推定の精度を向上させることができる．

まず校正手法の定式化を行い，続いてシミュレーション実験による精度評価と，実験装置で得られた実画像を用いた精度評価実験について述べる．

3.1 手法

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3.1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

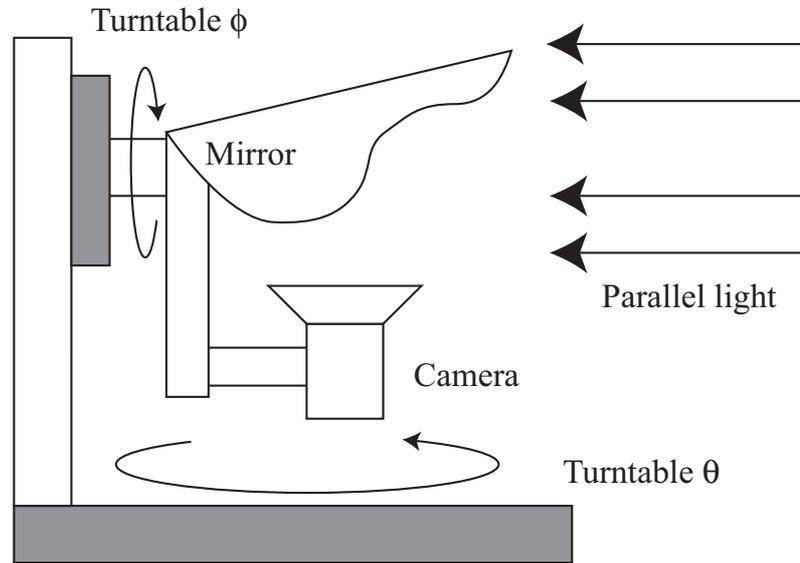


図 3.1: 平行光源とターンテーブルを用いた校正システム

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。

3.1.1 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、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

$$R_C R_{T1} \mathbf{v}_0 = R_C R_{T2} \mathbf{v}_0 \quad (3.1)$$

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, カメラの回転に伴うカメラ原点の平行移動は方程式に現れない. 式 (3.1) は次のように変形される.

$$(R_{T1} - R_{T2})v_0 = 0 \quad (3.2)$$

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出来る. 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. 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, R_T は次式で表される.

$$R_T = R_\theta R_\phi \quad (3.3)$$

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 3.2 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.

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, 光像位置が概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.

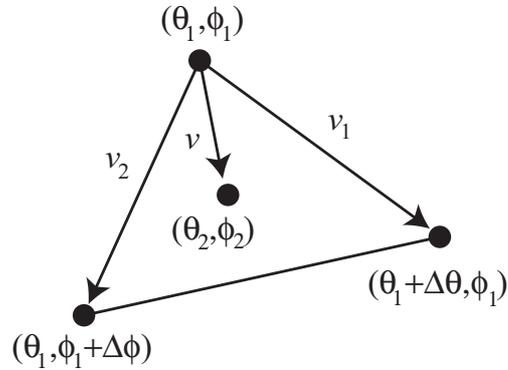


図 3.2: 対応する回転パラメータの算出

3.1.2 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。

$$\sum_m \| N_{R,t}(x) - n \|^2 \quad (3.4)$$

ここで n は、図 2.2 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 (3.4) 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 (3.4) 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無い場合、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。

$$v = R_C R_T v_0 \quad (3.5)$$

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。

3.2 実験による精度評価

3.2.1 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

表 3.1: 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.
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

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) 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 3.1 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 × 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 9.0mm, 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 50.0mm とした。提案手法の精度を実証するため, 表 3.2 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 は比較対象となる従来手法であり, 特徴点として点光源を用い, 鏡面の位置姿勢と同時に点光源の位置も推定する手法である。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

表 3.2: 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: 点光源を使用する SFM 手法, Method 2: 構造化された点光源を使用する手法

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

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 箇所から撮影した．手法 1 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 2 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 1 は SFM 手法であり，手法 2 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 (3.4) 内のベクトル n を次式で求めた．

$$\frac{\frac{p'-x}{\|p'-x\|} - \frac{m}{\|m\|}}{\left\| \frac{p'-x}{\|p'-x\|} - \frac{m}{\|m\|} \right\|} \quad (3.6)$$

ここで p' はカメラ座標形における点光源の位置であり， $p' = R_C p + t_C$ である．手法 1 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 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 3.3 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 1 の 4 分の 1 程度，手法 2 の半分程度であり，提

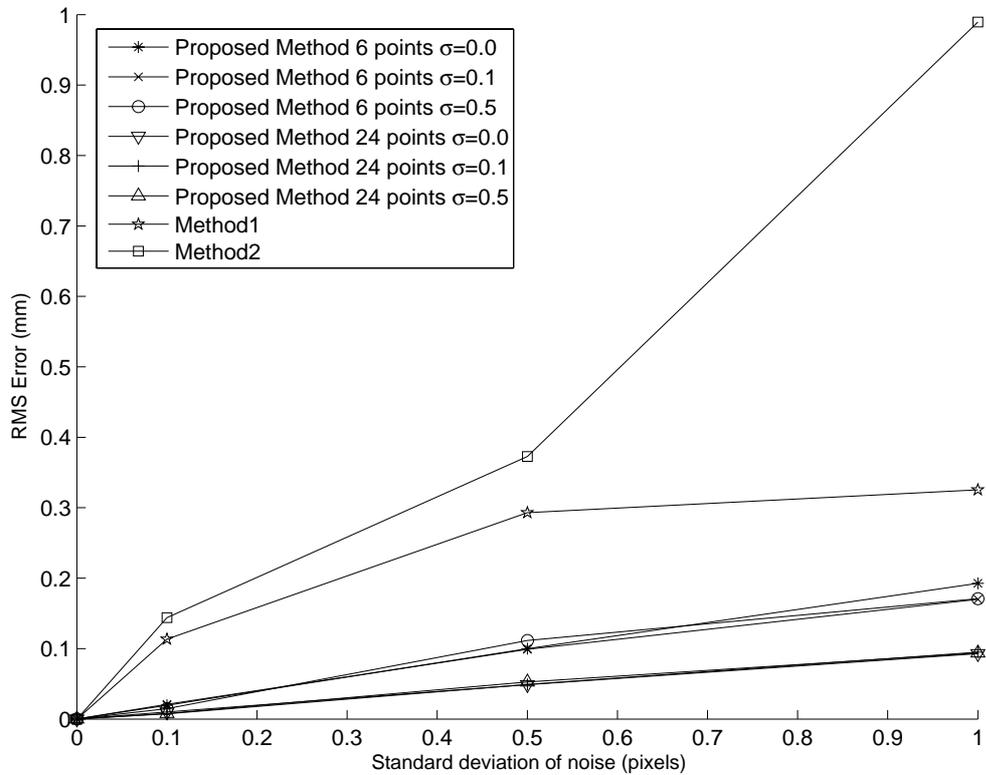


図 3.3: 鏡面位置の推定誤差の比較

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 3.4 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．

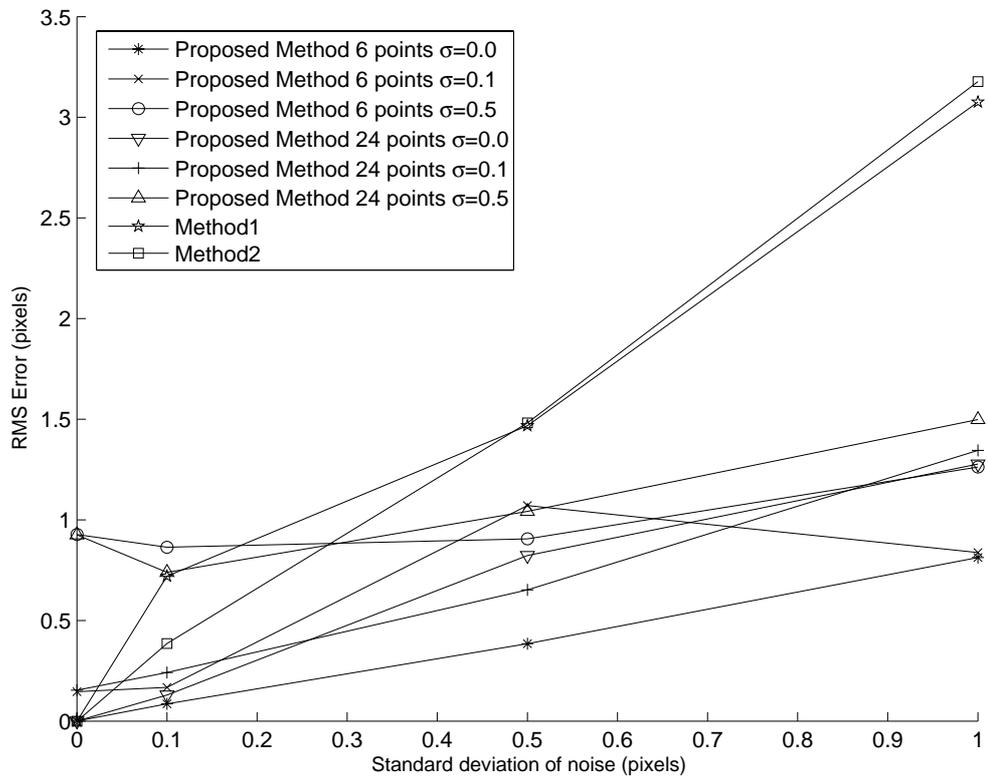


図 3.4: 推定された鏡面位置による光像の再投影誤差の比較

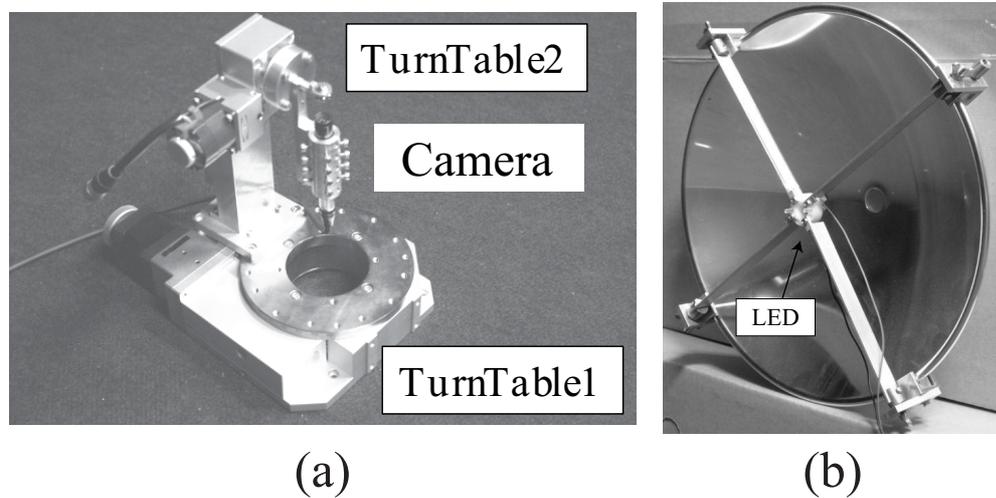


図 3.5: 実験装置

3.2.2 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3.5(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、放物面鏡とLEDを用いた照明装置を製作した(図3.5(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[9]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3.6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[31]を用いて求めた。中央鏡の曲率半径は9.0mm、直径と高さは25.76mmと9.0mm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68000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

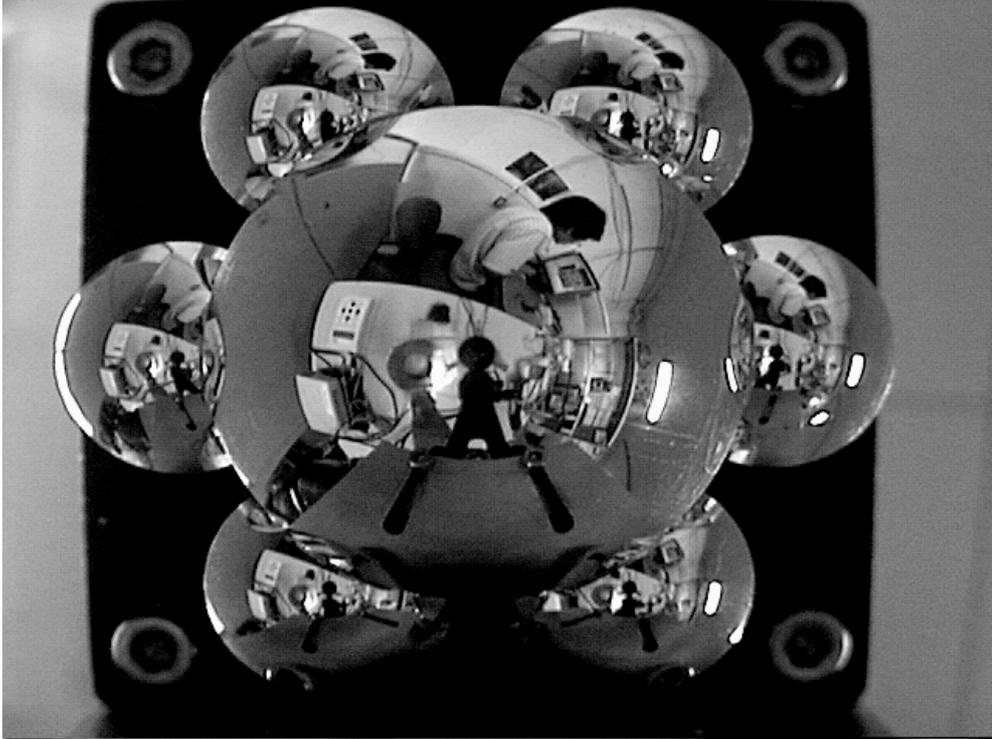


図 3.6: 複合放物面鏡

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．

第4章 平行光源のペアを用いた 鏡面の位置姿勢計測

本章では、反射屈折撮像系に含まれる鏡面の位置および姿勢パラメータを校正するため、二つの平行光源に同時に照射される位置で撮像系を自由に回転させ、そこで得られた光像に基づいて校正を行う手法について述べる。この手法では、撮像系がどのような姿勢になったときも、撮像系から観測される二つの平行光源からの光線ベクトルの相対角度は不変であることを拘束条件として、未知パラメータの推定を行う。二つの平行光源からの光線ベクトルの相対角度は、既知であっても未知であってもよい。

第3章で述べた手法と比較して、本章の手法では撮像系の姿勢パラメータを使用しないため、撮像系の姿勢パラメータを得るためのターンテーブルが不要となり、校正のための装置が簡単になるという利点がある。

まず平行光源のペアを同時に観測した場合に得られる拘束条件について述べ、続いてその拘束条件を用いた校正手法について述べ、その後にシミュレーション実験による精度評価と、実験装置で得られた実画像を用いた精度評価実験について述べる。

4.1 平行光ペアの射影

2つの平行光（平行光ペア）を同時に反射屈折撮像系で観測することを考える。2つの平行光の相対角は一定となるように光源が設置されているものとする。撮像系に固定されたカメラ座標系において、撮像系で観測される2つの平行光の入射方向ベクトルの相対角は、光源に対する撮像系の位置・姿勢によらず一定となる。図4.1は、反射屈折撮像系が異なる2つの位置姿勢において平行光ペアを観測した状況を示している。反射屈折光学撮像系であるため、カメラに対する鏡の相対位置は固定されている。撮像系が位置 O にあるとき、平行光ペアは x_1, x_2 で反射し、

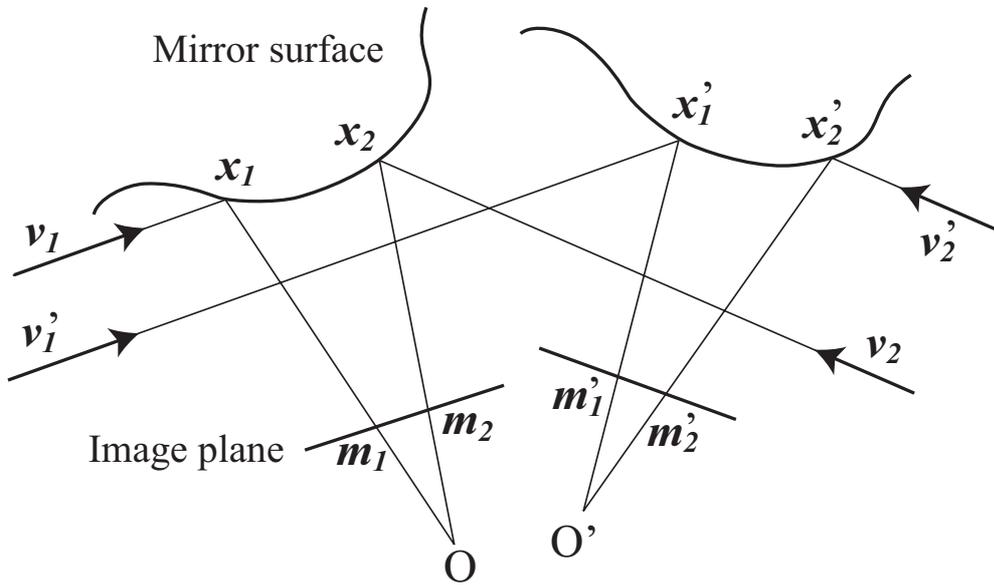


図 4.1: 位置姿勢が異なる撮像系への平行光ペアの射影

反射光は撮像面上の点 m_1, m_2 に射影される。同様に、撮像系が位置 O' にあるとき、平行光ペアは x'_1, x'_2 で反射し、撮像面上の点 m'_1, m'_2 に射影される。 v_1, v_2 と v'_1, v'_2 は、式 (2.6) によって計算された入射平行光のベクトルである。平行光ペアの相対角は、光源に対する撮像系の位置姿勢によらず一定であるため、次の拘束条件が得られる。

$$v_1 \cdot v_2 = v'_1 \cdot v'_2 \quad (4.1)$$

4.2 平行光ペアを用いた鏡の位置姿勢推定手法

前節で述べた拘束条件を用いて、平行光源のペアに同時に照射される位置で反射屈折撮像系を自由に回転させ、そこで得られた光像に基づいて校正を行う手法について述べる。

4.2.1 相対角誤差の最小化による鏡の位置姿勢の推定

式 (4.1) の拘束条件より、下記のコスト関数を最小化することによって、鏡の位置姿勢を推定する。平行光ペアの相対角が既知である場合、コス

ト関数は

$$E_1 = \sum_i \| \mathbf{v}_{i1} \cdot \mathbf{v}_{i2} - \cos \alpha_i \|^2 \quad (4.2)$$

となる．ここで i は複数観測された平行光ペアの番号であり， α_i は i 番目のペアの相対角である．一方，平行光ペアの相対角が未知の場合には，相対角が不変であることから，次のコスト関数を用いる．

$$E_2 = \sum_{i \neq j} \| \mathbf{v}_{i1} \cdot \mathbf{v}_{i2} - \mathbf{v}_{j1} \cdot \mathbf{v}_{j1} \|^2 \quad (4.3)$$

コスト関数のパラメータはカメラに対する鏡の位置姿勢を表す回転 R と平行移動 t である．式 (4.2) あるいは式 (4.3) の最小化は非線形問題となるため，Levenberg-Marquardt 法のような非線形最小化法を用いて R と t を推定する．提案手法の手続きは次のようになる．

1. R と t を決定する．
2. 各平行光が射影された点 m に対し，鏡上での反射点 x を計算する．
3. 反射点 x における単位法線ベクトル $N_{R,t}(x)$ を計算する．
4. 各入射平行光のベクトル v を計算する．
5. コスト関数（式 (4.2) または式 (4.3)）を計算する．
6. 非線形最小化法によって R と t を更新する．
7. ステップ 2-6 を収束するまで繰り返す．

現在の実装においては，初期パラメータはユーザが与える必要があるため，全ての射影点 m が反射点 x を持つように初期パラメータを決めている．校正の対象となる反射屈折光学系の設計値は真値の近傍にあると考えられるので，初期パラメータを設計値にとれば，真値近傍でのコスト関数の単峰性を仮定でき，非線型最小化法の適用には実用上問題ないと考えられる．4.2.2 に述べるように，鏡が数多くのパラメータによって表される形状や，メッシュモデルで表されるノンパラメトリックな形状のように複雑な形状の場合には，反射点の計算は計算コストが高い．そこで提案手法では，グラフィックスハードウェアを用いて直接入射ベクトルを計算し，計算時間を削減する手法を提案する．また，最小化の過程において，鏡の位置姿勢によっては，射影点に対応する反射点が存在しな

い場合がある．そこで，全ての射影点が鏡上に反射点を持つようにするため，反射点が存在しない場合には式(4.2)や式(4.3)を計算する代わりに，大きな値をペナルティとして加える．

4.2.2 入射光ベクトルの計算

提案手法では入射光ベクトルの計算が重要であり，2つの方法が挙げられる．第1の方法は，鏡の形状がパラメトリックである場合に，視線ベクトルと鏡の交点を求める連立方程式を解き， x を求める方法である．いったん x が得られれば，法線ベクトル $N_{R,t}(x)$ は x における鏡表面の2つの接ベクトルの外積によって計算される．そして入射光ベクトル v は式(2.6)から計算できる．

しかし，鏡形状がパラメトリックであっても複雑な形状であったり，ノンパラメトリックな形状であったりする場合には，逐次最小化の中で何度も方程式の解を求めることは計算コストが高くつく．特に，鏡形状がメッシュモデルで表される場合には，各メッシュに対して視線ベクトルと交点を持つかどうか探索しなければならない．そこで第2の方法として，様々な鏡形状に対して提案手法を適用するために，鏡形状モデルをパラメータ R, t およびカメラの内部パラメータ K を用いて画像面に射影し， x を求める方法を提案する．この方法は鏡形状を画像面にレンダリングすることに等しいため，鏡形状がメッシュモデルで近似されている場合には，コンピュータグラフィックス(CG)技術を用いて簡単に実行できる．さらに近年発達しているCG技術を用いて入射光ベクトル v をレンダリング時に直接計算する．グラフィックスハードウェアを用いて v を計算するためのソースコードを付録に示す．

4.2.3 平行光ペアの生成

提案手法は平行光を観測する必要があり，それには次の2つの方法が考えられる．

- 遠方にあるマーカの特徴点を利用する．
- コリメート光を用いる．

前者の方法では，遠方にマーカがある場合，特徴点までの距離に対して，カメラの小さな平行移動は無視できる．そのため，特徴点からの入射

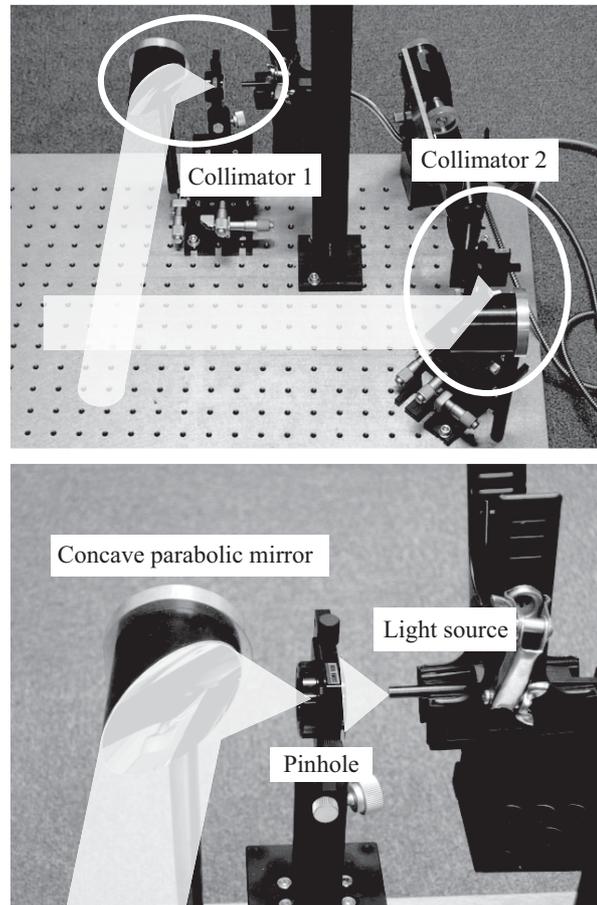


図 4.2: 2つのコリメータを用いた平行光ペアの生成．それぞれのコリメータは光源，ピンホール，凹面放物面鏡からなる．

光ベクトルはカメラが動いた場合でも不変である．この方法では，反射屈折光学系のフォーカスが無限遠に設定されていない場合，校正時の焦点深度と実際に光学系を利用する際の焦点深度が異なり，フォーカスが問題となり得る．その問題を解決するには，校正時にレンズの絞りを最小にし，露光時間を長くすることによって画像がぼけることを回避する方法をとる．無限遠点を用いる代わりに消失点を用いる方法 [24, 25, 26] も考えられるが，反射屈折光学系の場合，消失点をどのように求めるかも問題となりうる．

一方後者は，コリメータを用いて平行光を生成する方法である．コリメータの構成方法としては，図 4.2 に示すように点光源と凹面放物面鏡

を用いる方法である．まず，光源の前にピンホールを置き，点光源とする．ピンホールを放物面鏡の焦点位置に置くことによって，放物面鏡で反射された光は平行光となる．図中で白色の部分が照明されている部分である．この方法の利点は，小さな計測システムを作ることができること，および画像中に射影された点光源の重心を計算するため，画像のぼけが問題とならないことである．

4.3 実験による精度評価

4.3.1 シミュレーションによる精度評価

まず，シミュレーション実験において提案手法の精度について評価する．本シミュレーション実験では，凸型放物面鏡と透視投影カメラから構成される，反射屈折光学系の鏡の位置姿勢を推定する．透視投影カメラの内部パラメータ K は

$$K = \begin{pmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

と定義する．ここで， f はカメラの焦点距離であり， c_x と c_y は主点位置である．また， h を放物面の曲率半径とすると，鏡の形状は z 軸まわりに対称な放物面 $z = \frac{1}{2h}(x^2 + y^2)$ で表される．本実験では，画像サイズ 512×512 ピクセル，焦点距離 $f = 900$ ，主点位置 $c_x = c_y = 255$ ，曲率半径 $h = 9.0$ とした．また，鏡の回転・平行移動パラメータの真値は $R = I$ ， $t = (0, 0, 50)$ とした．入射平行光ペアの相対角は 30 度と 90 度の場合について調べ，光学系を y 軸と z 軸まわりに回転し， 24 ペアの入力データを用いた．

まず，耐ノイズ性能を評価するために，観測ノイズとして，入射平行光が射影される画像点の位置にノイズを加えて， R と t の推定を行った．誤差のコスト関数が単峰であると仮定すると，近傍からの収束は，必ず正解に収束する．そこで， R と t の推定のための初期値は，それぞれの真値とし，標準偏差 $0, 0.1, 0.5, 1.0$ ピクセルのガウシアンノイズを観測ノイズとして加えたシミュレーションを実施した．コスト関数として E_1 を用いる場合には，平行光ペアの相対角 α についてもノイズを加え，標準偏差 $0, 0.1, 0.5$ 度のガウシアンノイズを用いた．シミュレーション実験

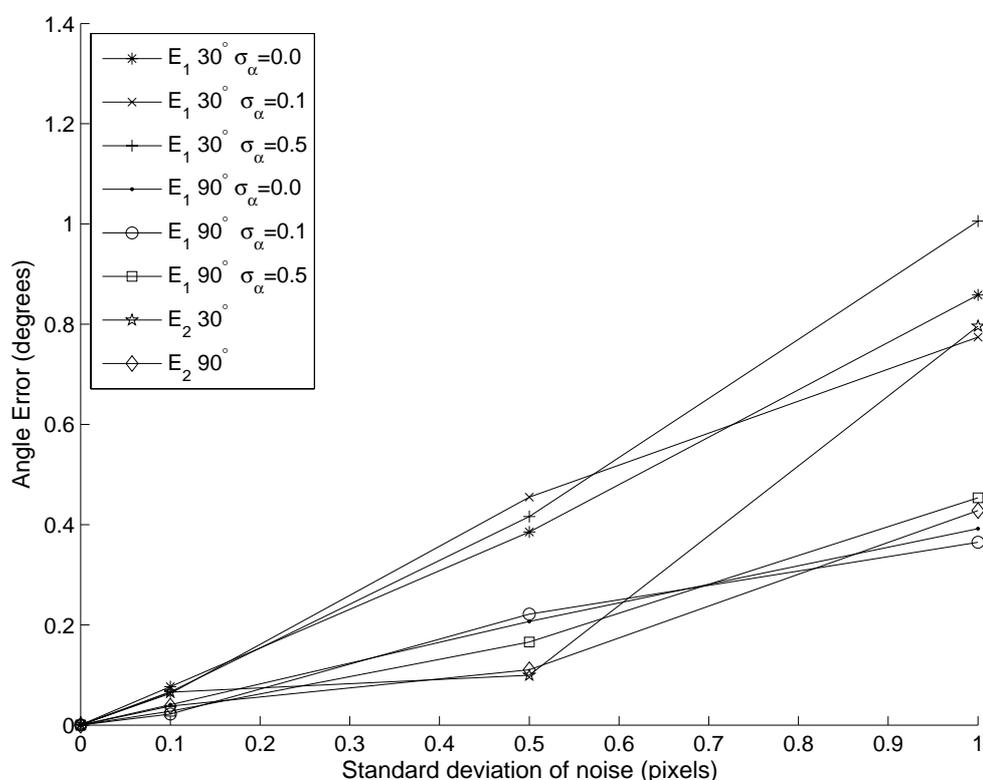


図 4.3: 射影位置のノイズに対する鏡の姿勢 R の推定誤差。

結果の R と t の推定誤差を図 4.3 と図 4.4 に示す。図中 E_1 および E_2 はそれぞれ提案手法のコスト関数に E_1 および E_2 を用いた場合である。 R の誤差として、放物面鏡の回転対称軸の真値と推定値のなす角度をとった。また、 t の誤差として、放物面鏡の頂点位置の真値と推定値の距離をとった。推定したパラメータの精度を評価するために、推定したパラメータを用いて入射光を再投影した点と、入力データ点との二乗平均平方根誤差 (root-mean-square error, RMS 誤差) を計算した。図 4.5 は E_1 および E_2 を用いた場合の RMS 誤差である。これより、明らかに相対角が 90 度の場合が 30 度の場合よりも誤差が小さい。この理由は、相対角が小さく、画像上で近い場所に投影される場合、拘束が弱くなるためであると考えられる。また、誤差は主に入力画像点のノイズに依存し、相対角の誤差の影響は小さいといえ、そして、 E_2 の精度は E_1 の精度と同程度であるため、相対角が未知の場合でも提案手法は適用可能であるといえる。

次に、カメラの内部パラメータ K に誤差を加えて、提案手法の誤差を

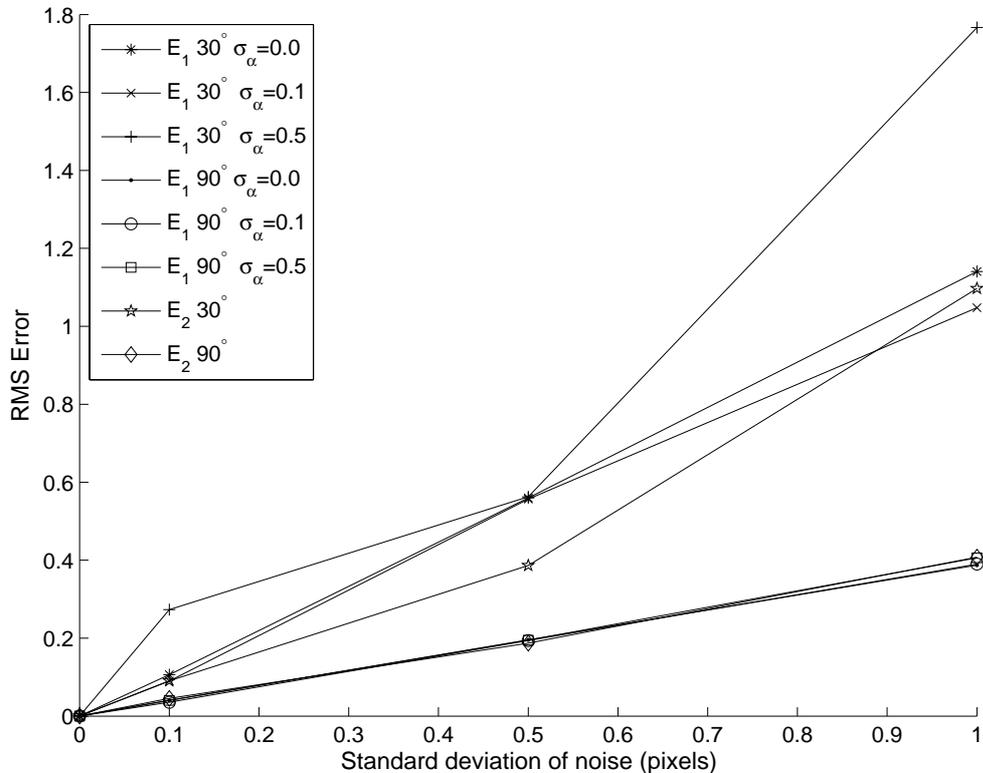


図 4.4: 射影位置のノイズに対する鏡の位置 t の推定誤差 .

評価した．図 4.6 および図 4.7 は， f または c_x を変化させたときの E_1 の RMS 誤差を示している．このとき他のパラメータは真値に固定している．図の横軸は f または c_x の真値からの差である．この結果から，RMS 誤差は主点位置の誤差に大きく影響を受けることが分かった．したがって，提案手法を用いる前に主点位置 (c_x, c_y) を正確に求めておくことが必要である．一方，焦点距離 f の影響はそれに比べて小さく，許容できる f の誤差は主点位置に比べると大きいといえる．

次に，他の外部マーカを用いる反射屈折光学系校正手法と提案手法との精度の比較を行った．結果を図 4.8 に示す．これは，外部マーカが撮像系に射影される画像点位置に加えたガウシアンノイズに対する，再投影座標の RMS 誤差を示している． E_1 では平行光ペアの相対角についても標準偏差 0.5 度のガウシアンノイズを加えた．推定すべきパラメータ数は鏡の位置と姿勢を示す 6 個である．図中の Previous Method は，第 3 章で提案した平行光源とターンテーブルを用いた校正手法であり，24 点の入

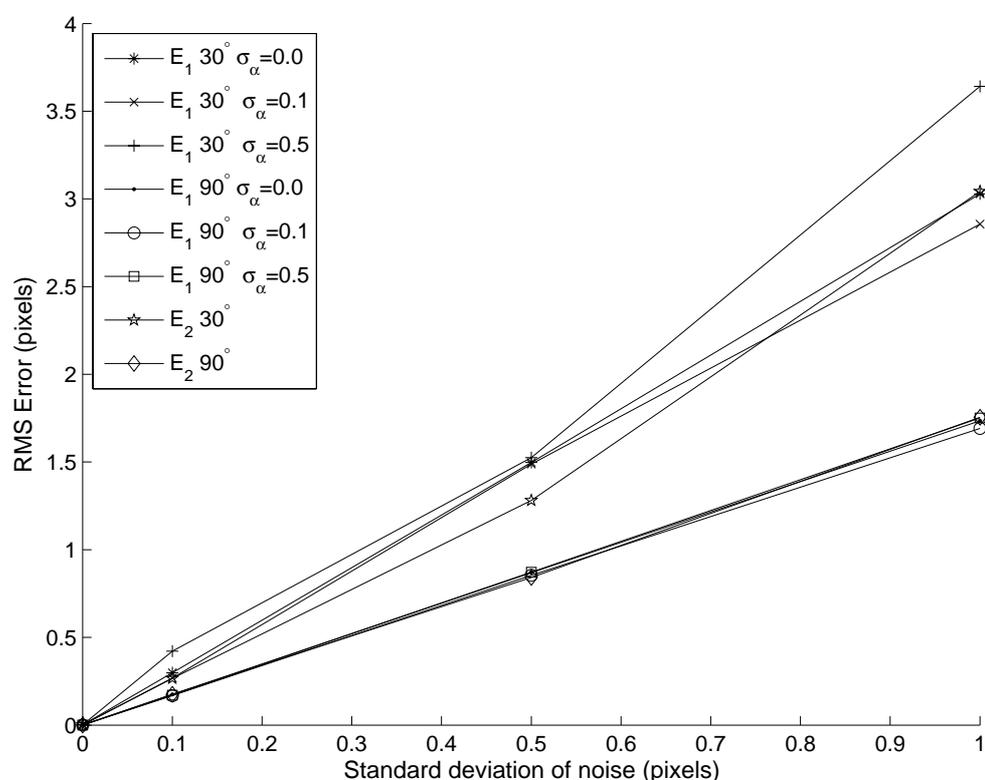


図 4.5: 射影位置のノイズに対する再投影座標の RMS 誤差 .

カデータを用いた．観測される入射平行光のベクトルには標準偏差0.5度のガウシアンノイズを加えた．推定すべきパラメータ数は鏡の位置姿勢および撮像系の回転パラメータの，合計9個である．比較対象となる従来手法 Method1 と Method2 は外部マーカとして点光源を用い，鏡面の位置姿勢と同時に点光源の位置も推定する手法である．点光源の個数は6個とし，撮像系は4つの位置・姿勢から撮像するものとした．Method1では点光源間の相対位置は未知であるとするのに対し，Method2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，Method1はSFM手法であり，Method2は構造化された観測対象を用いた校正手法である．推定すべきパラメータ数は，Method1では48個，Method2では30個である．この結果から，推定するパラメータ数を減らすことにより計測精度の向上が期待できることが分かった．本章の提案手法と第3章の提案手法は，誤差が同程度の部分があるが，本章での提案手法はターンテーブルのような装置を使わないため，実用面で有利であるといえる．

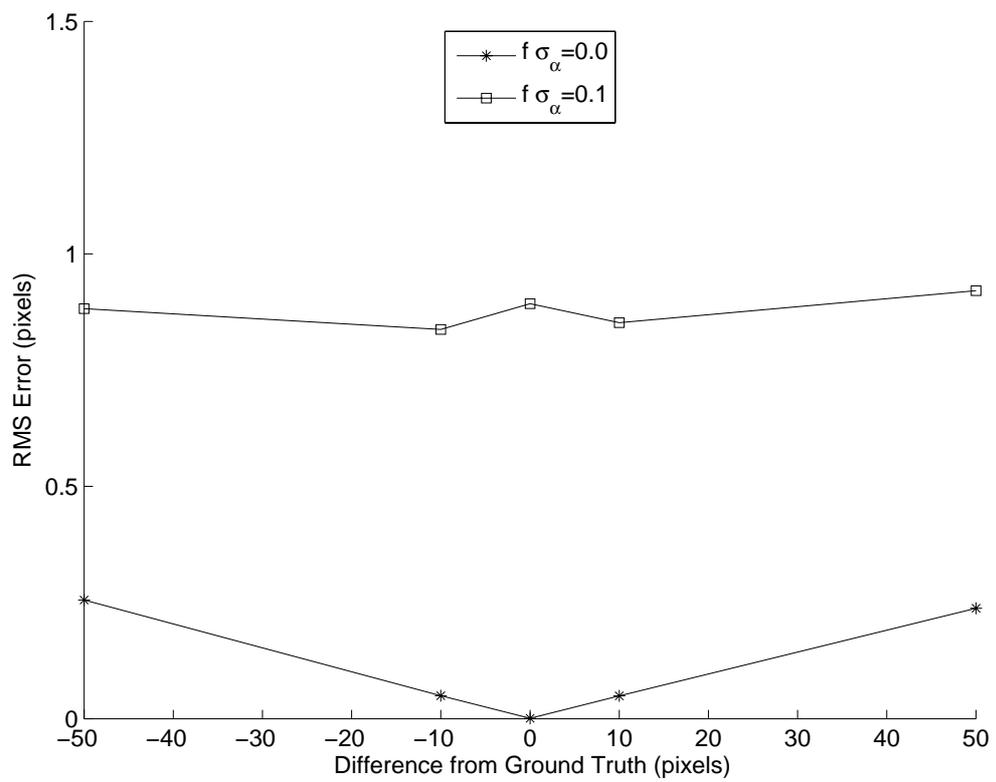


図 4.6: カメラの焦点距離の誤差に対する再投影座標の RMS 誤差 .

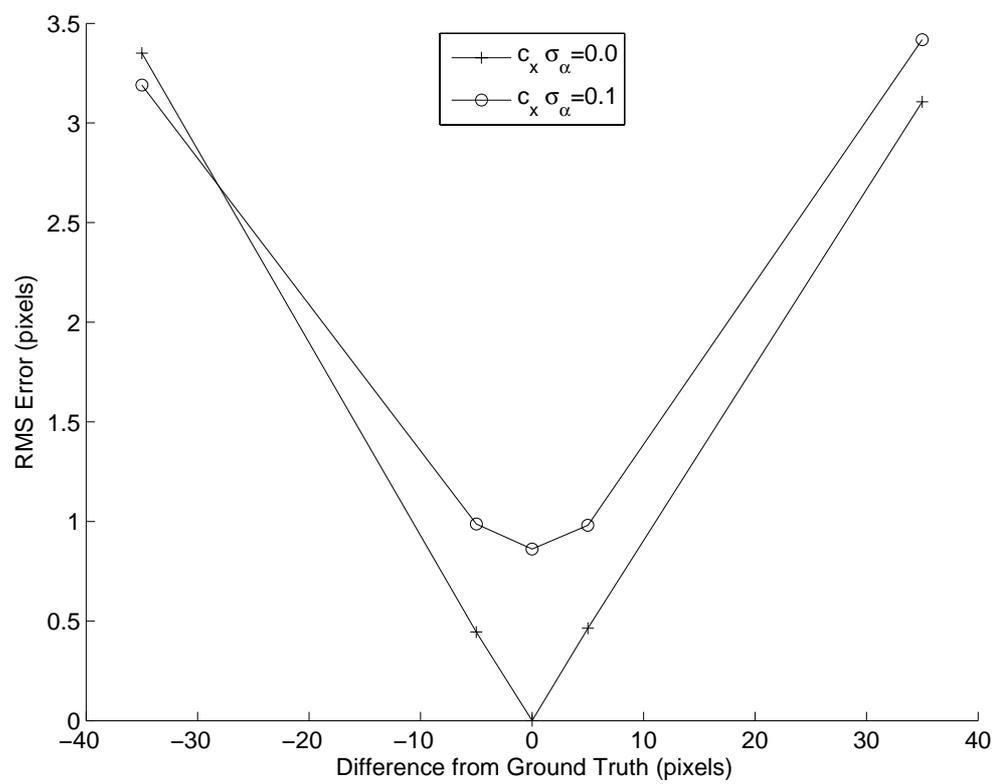


図 4.7: カメラの主点位置の誤差に対する再投影座標の RMS 誤差 .

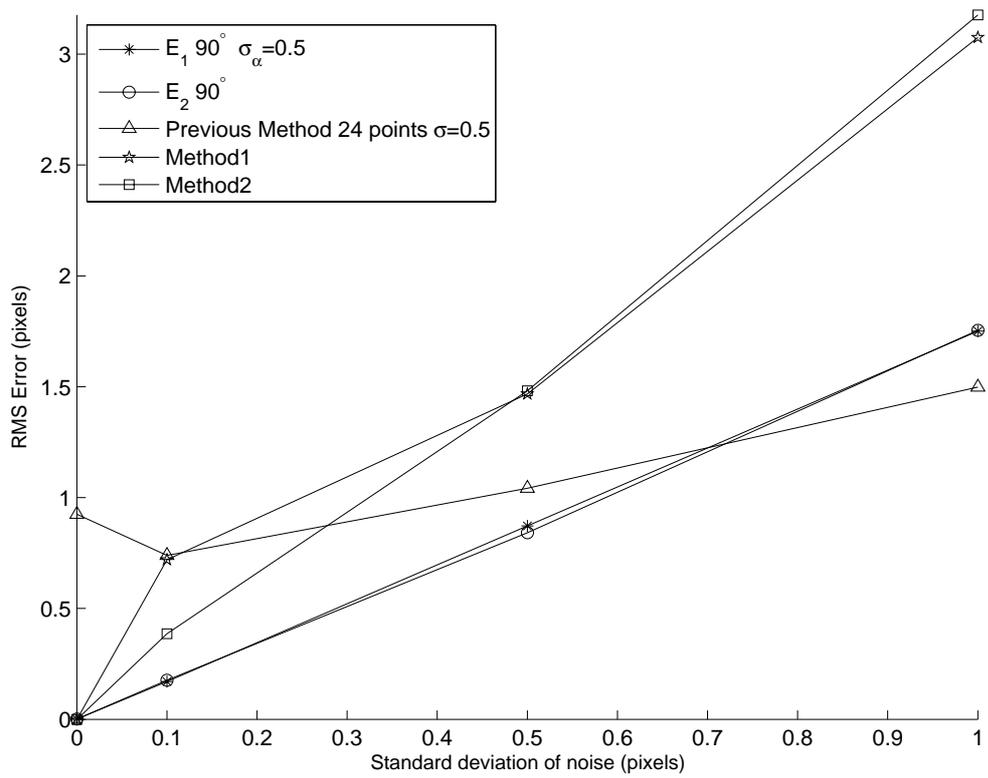


図 4.8: 射影位置のノイズに対する再投影座標の RMS 誤差の他手法との比較.

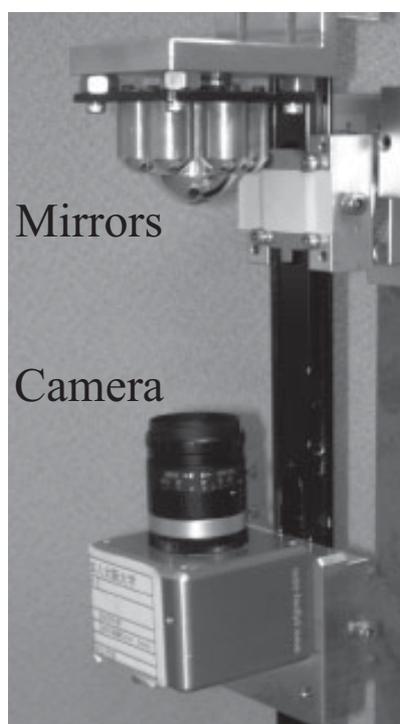


図 4.9: カメラに装着した複合放物面鏡 .

4.3.2 実画像を用いた鏡の位置姿勢推定

次に、図 4.9 に示した複合放物面鏡を用いたシステム [27, 28] の鏡の位置姿勢を推定する．このシステムは 7 個の凸型放物面鏡と透視投影カメラ (PointGrey 社 Scorpion, 画像サイズ 1600×1200 ピクセル, 画角約 22.6 度) から構成される．図 4.10 はこのシステムの画像例である．この構成の場合, 単一視点の光学系ではない．レンズ歪み [29] を含めて, 内部パラメータについては事前に校正した．中央鏡, 周辺鏡の曲率半径 h はそれぞれ, 9.0mm , 4.5mm である．中央鏡の直径, および高さはそれぞれ 25.76mm , 9.0mm であり, 周辺鏡はそれぞれ 13.0mm , 4.5mm である．画像中における中央鏡, 周辺鏡の直径はそれぞれ 840 , 450 ピクセルである．

本実験では, 平行光を観測する方法として, 遠方マーカの観測による方法と, コリメート光を利用する方法を用いて, 実画像からの鏡の位置姿勢推定を行った．推定の際の鏡の位置と姿勢の初期値は, 光学系の設計時に定めた設計値を用いた．

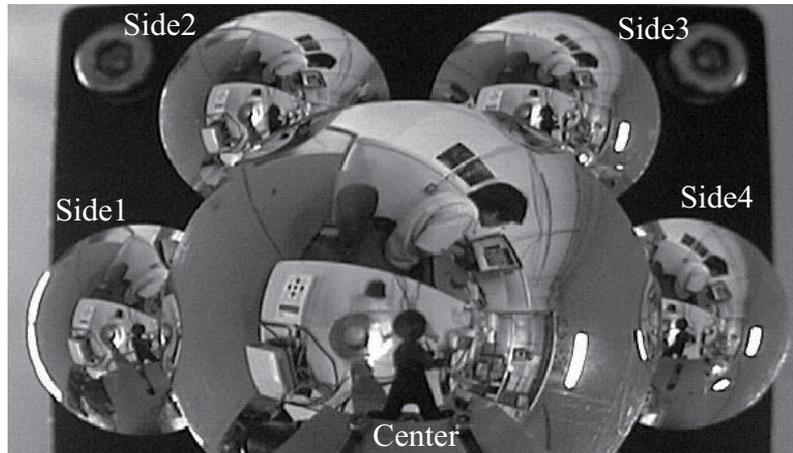


図 4.10: 複合放物面鏡を用いた画像例 .

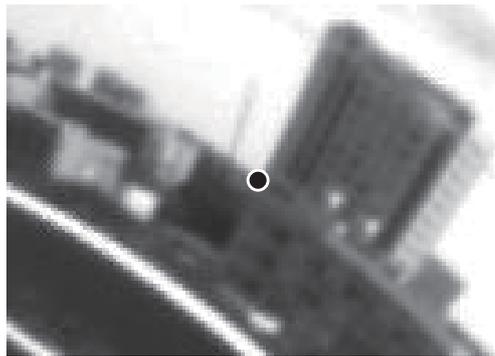


図 4.11: 平行光源として用いた遠方特徴点の例 .

まず最初に、遠方の物体を観測して推定を行った。図 4.11 は用いた特徴点の例である。特徴点はカメラから 260m 先にあるビルの角である。光学系全体を回転させ、78 ペアの平行光を観測した。平行光間の相対角は 15 度から 170 度であり、既知とする。実験では、中央鏡と 4 つの周辺鏡の位置姿勢をそれぞれ別に独立して推定を行った。図 4.12 は推定した鏡の位置を、鏡の形状をカメラ視点からレンダリングして表示したものである。本実験では、鏡位置および入射光ベクトルの真値が未知であるため、下記の基準を用いて精度を評価する。入射光の射影点が p_1, p_2 であり、式 (2.6) によって計算された入射光ベクトルが v_1, v_2 であるとする

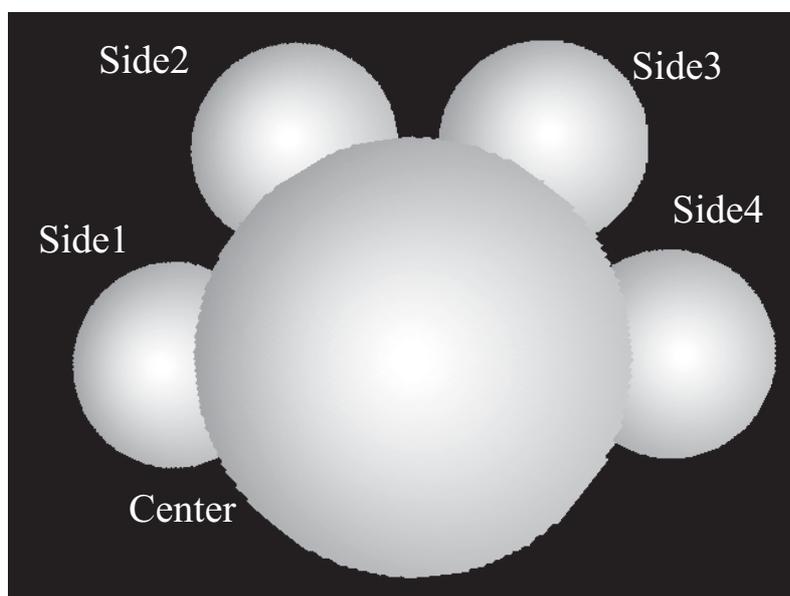


図 4.12: 提案手法によって推定された鏡位置 .

と，誤差を下記の式で計算する .

$$\min_{\mathbf{q}} \sqrt{\|\mathbf{p}_2 - \mathbf{q}\|^2} \quad \text{subject to} \quad \mathbf{v}_q \cdot \mathbf{v}_1 = \cos \alpha \quad (4.5)$$

ここで \mathbf{v}_q は，画像点 q に対応する入射光ベクトルである．この基準は画像のピクセル単位で誤差を評価するものであり，その結果は表 4.1 に示すものとなった．入射光の方向によっては他の鏡によってオクルージョンとなり，観測されない場合があるので，鏡によって用いた平行光ペアの数は異なる．誤差は，式 (4.5) によって計算された値の RMS である．入力画像点には 0.5 ピクセル程度のノイズがあると考えられるため，表 4.1 に示した 1 ピクセル前後の誤差は，妥当な結果であるといえる．

次に，図 4.2 に示したシステムを用いて生成したコリメート光を観測し，提案手法の評価を行った．平行光間の相対角は 87.97 度である．図 4.13 に示すように 2 つの平行光が同時に投影され，光学系の位置姿勢を変えて 60 ペアの平行光を観測した．本実験では中央鏡の位置を推定し，上述の実験と同様に評価した式 (4.5) の RMS 誤差は 0.35 ピクセルとなった．遠方マーカを用いた場合よりも誤差が小さくなったが，これはコリメート光を用いた場合に入力点のノイズが小さくなり，精度が増したものである．

表 4.1: 推定した鏡位置姿勢を用いて計算された式 (4.5) の RMS 誤差 .

Mirror	Number of Pairs	RMS Error (pixels)
Center	78	0.84
Side1	21	0.87
Side2	45	1.05
Side3	45	1.16
Side4	21	0.59

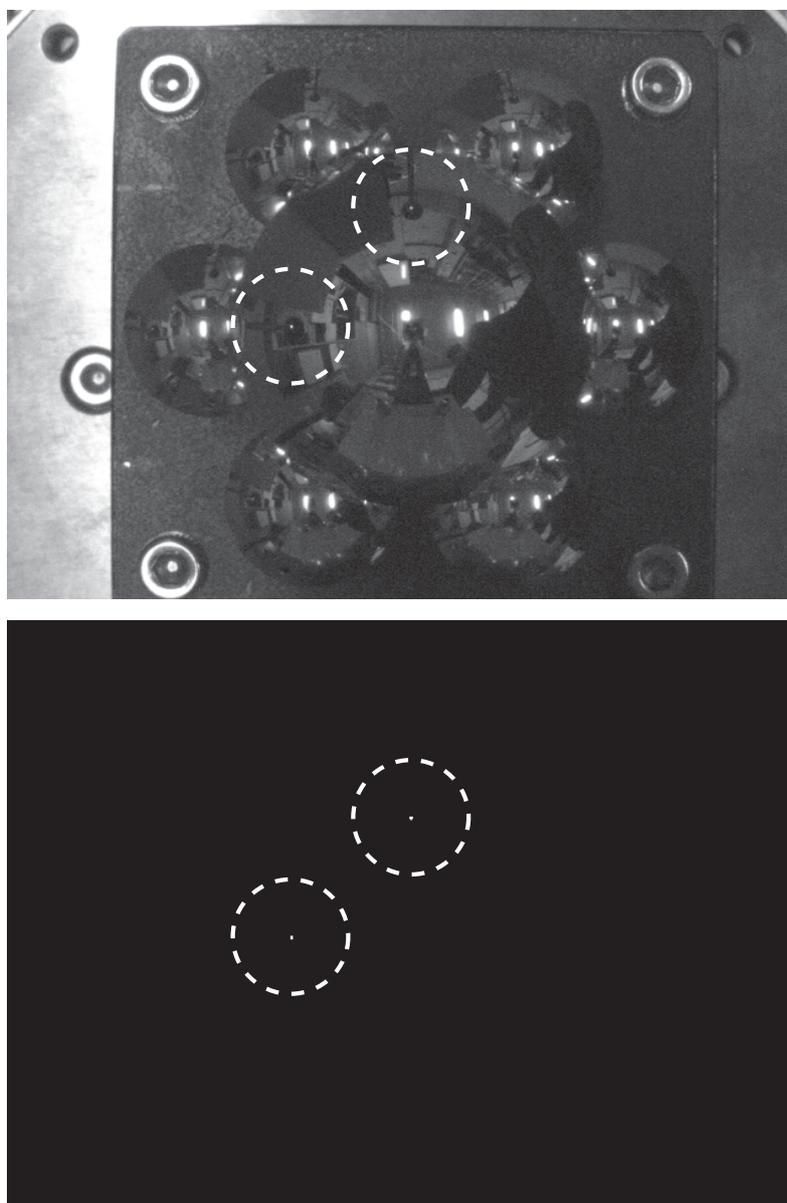


図 4.13: 上段：入力画像例．下段：部屋の照明を消して取得した2つのコリメート光の例．

第5章 結論

本論文は、反射屈折撮像系の校正のために、撮像系に含まれる鏡面の位置および姿勢を推定する2種類の手法を提案し、それぞれの手法の実現の可能性を数値シミュレーションならびに試作システムを用いた実験により検証した結果をまとめたものである。

得られた主要な結果は、以下のように要約できる。

- 単一視点を仮定せず、また任意の形状の鏡面を含む反射屈折撮像系に対し、その外部に観測対象となる光源を配置し、鏡面での光線の反射の条件を用いて、鏡面の位置・姿勢を推定するアルゴリズムが定式化された。
- 上記の観測対象として平行光を照射する光源（平行光源）を用いると、鏡面の位置・姿勢の推定において、それ以外に同時に推定しなければならないパラメータの数を減少させることができ、それによって推定の精度を向上できることが示された。
- 反射屈折撮像系を2軸ターンテーブルに搭載し、その外部に平行光源を設置し、ターンテーブルを回転させながら撮像系で光源を観測する手法を用いて、撮像系に含まれる鏡面の位置・姿勢を推定できることが示された。また、平行光源を使用しない手法との比較を行い、精度が向上することが示された。
- 平行光源をペアとなるように設置し、両方からの光線の下で撮像系を自由に回転させながら光源のペアを観測する手法を用いて、撮像系に含まれる鏡面の位置・姿勢を推定できることが示された。また、平行光源を使用しない手法との比較を行い、精度が向上することが示された。
- 上記2種類の提案手法のうち、前者の手法では撮像系の姿勢角としてターンテーブルの正確な回転角が使用できる。後者の手法は、

ターンテーブルのような複雑な装置を使用しないため，実用面では有利であると考えられる．

以上の諸結果から，本論文で述べた手法による，反射屈折撮像系の高精度な校正の可能性が示された．また，反射屈折撮像系を構成するものではない鏡面に対しても，その鏡面に対してカメラを設置し，カメラと鏡面の組を反射屈折撮像系と見なせば，同様の手法を用いて，対象となる鏡面のパラメータを求めることが可能である．

視覚システムの様々な応用は，今後ますます重要性を増すものと思われる．それらに対して本研究の成果が貢献できることを期待する．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始一貫して懇切な御指導を賜りました，八木康史教授に対して，心から御礼を申し上げます．また，有益な御示唆と御助言を賜りました佐川立昌助教に，心から感謝の意を表します．さらに，向川康博准教授，越後富夫先生に深く御礼申し上げます．

本研究をまとめるにあたり，御教示と細部にわたる校閲をいただきました井上克郎教授，増澤利光教授，楠本真二教授に謹んで感謝の意を表します．さらに本研究において御支援をいただきました産業科学研究所八木研究室の教職員および大学院生，学生の皆様に御礼申し上げます．

本研究遂行の機会を与えていただいた近畿大学生物理工学部の本津茂樹学部長，松本俊郎学科長，並びに関係上司の方々に深謝いたします．また，数々の御指導と御配慮を賜った稲荷隆彦教授に深く感謝いたします．さらに，本研究の遂行に対して暖かい御理解と御支援をいただきました近畿大学生物理工学部および知能システム工学科の皆様に御礼申し上げます．

本研究の出発点となりました大阪府立大学工学部航空工学科（当時）にて御指導をいただきました，津村俊弘先生，藤原直史先生，橋本雅文先生，大久保博志先生，小松信雄先生に，深く御礼を申し上げます．また御支援いただきました当時の教職員，大学院生，学生の皆様に，御礼を申し上げます．

参考文献

- [1] H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji: “Omni-directional stereo”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **14**, 2, pp. 257–262 (1992).
- [2] K. Yamazawa, Y. Yagi and M. Yachida: “Obstacle detection with omni-directional image sensor hyperomni vision”, IEEE the International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, pp. 1062 – 1067 (1995).
- [3] S. Nayar: “Catadioptric omnidirectional camera”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 482–488 (1997).
- [4] T. Svoboda and T. Pajdla. Epipolar geometry for central catadioptric cameras. International Journal of Computer Vision, 49(1):23-37, 2002.
- [5] J. Gaspar, C. Decco, J. O. Jr. and J. Santos-Victor: “Constant resolution omnidirectional cameras”, Proc. the Third Workshop on Omnidirectional Vision, pp. 27–34 (2002).
- [6] R. Hicks and R. Perline: “Equi-areal catadioptric sensors”, Proc. the Third Workshop on Omnidirectional Vision, pp. 13–18 (2002).
- [7] R. Swaminathan, S. Nayar and M. Grossberg: “Designing Mirrors for Catadioptric Systems that Minimize Image Errors”, Fifth Workshop on Omnidirectional Vision (2004).
- [8] K. Kondo, Y. Yagi and M. Yachida: “Non-isotropic omnidirectional imaging system for an autonomous mobile robot”, Proc. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain (2005).

- [9] Y. Kojima, R. Sagawa, T. Echigo and Y. Yagi: “Calibration and performance evaluation of omnidirectional sensor with compound spherical mirrors”, Proc. The 6th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical cameras (2005).
- [10] C. Geyer and K. Daniilidis: “Paracatadioptric camera calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **24**, 5, pp. 687–695 (2002).
- [11] X. Ying and Z. Hu: “Catadioptric camera calibration using geometric invariants”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **26**, 10, pp. 1260–1271 (2004).
- [12] C. Mei and P. Rives: “Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids”, Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, pp. 3945–3950 (2007).
- [13] R. I. Hartley and A. Zisserman: “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition (2004).
- [14] D. Aliaga: “Accurate catadioptric calibration for realtime pose estimation of room-size environments”, Proc. IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 1, pp. 127–134 (2001).
- [15] D. Strelow, J. Mishler, D. Koes and S. Singh: “Precise omnidirectional camera calibration”, Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 689–694 (2001).
- [16] B. Micusík and T. Pajdla: “Autocalibration and 3d reconstruction with non-central catadioptric cameras”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, Washington US, pp. 58–65 (2004).
- [17] T. Mashita, Y. Iwai and M. Yachida: “Calibration method for misaligned catadioptric camera”, Proc. the Sixth Workshop on Omnidirectional Vision (2005).

- [18] R. Swaminathan, M. Grossberg and S. Nayar: “Caustics of catadioptric camera”, Proc. IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 2, pp. 2–9 (2001).
- [19] M. Grossberg and S. Nayar: “The raxel imaging model and ray-based calibration”, International Journal on Computer Vision, **61**, 2, pp. 119–137 (2005).
- [20] P. Sturm and S. Ramalingam: “A generic camera calibration concept”, Proc. European Conference on Computer Vision, Vol. 2, Prague, Czech, pp. 1–13 (2004).
- [21] 青木, 佐川, 向川, 越後, 八木: “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”, 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, **49**, SIG9(CVIM18), pp. 115–123 (2007).
- [22] R. Sagawa, N. Aoki, Y. Mukaigawa, T. Echigo and Y. Yagi: “Mirror localization for a catadioptric imaging system by projecting parallel lights”, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, pp. 3957–3962 (2007).
- [23] 佐川, 八木: “2つの平行光の観測による内部カメラパラメータの高精度なキャリブレーション”, 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, **49**, SIG6(CVIM20), pp. 89–100 (2008).
- [24] B. Caprile and V. Torre: “Using vanishing points for camera calibration”, International Journal of Computer Vision, **4**, 2, pp. 127–140 (1990).
- [25] K. Daniilidis and J. Ernst: “Active intrinsic calibration using vanishing points”, Pattern Recognition Letters, **17**, 11, pp. 1179–1189 (1996).
- [26] J. Guillemaut, A. Aguado and J. Illingworth: “Using points at infinity for parameter decoupling in camera calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **27**, 2, pp. 265–270 (2005).
- [27] E. Mouaddib, R. Sagawa, T. Echigo and Y. Yagi: “Two or more mirrors for the omnidirectional stereovision?”, Proc. of The second IEEE-EURASIP International Symposium on Control, Communications, and Signal Processing, Marrakech, Morocco (2006).

- [28] R. Sagawa, N. Kurita, T. Echigo and Y. Yagi: “Compound catadioptric stereo sensor for omnidirectional object detection”, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, Sendai, Japan, pp. 2612–2617 (2004).
- [29] R. Sagawa, M. Takatsuji, T. Echigo and Y. Yagi: “Calibration of lens distortion by structured-light scanning”, Proc. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, pp. 1349–1354 (2005).
- [30] 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.
- [31] Open Source Computer Vision Library.
<http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>.
- [32] 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.

付録

入射光ベクトルをレンダリングするためのソースコード

画像中の各ピクセルに対応する入射光ベクトルを計算するためのソースコードを下記に示す。このコードは HLSL (High-Level Shader Language) で書かれ、グラフィックスハードウェア上で実行される。まず鏡の形状は、頂点とそれらを連結する三角形からなるメッシュモデルで表されている。パーテックスシェーダ (VS) への入力は、鏡の頂点位置 (Pos) とその頂点における法線ベクトル (Nor) である。R は回転行列を表し、t を鏡の平行移動ベクトルとすると T は、 $T = [R|t]$ で表される行列である。また KT は、カメラの内部パラメータを K として、 $KT = K[R|t]$ で表される射影行列である。これらのパラメータは CPU で実行されるメインプログラムから与えられる定数である。v は各頂点に対して計算される入射光ベクトルである。v はグラフィックスハードウェアのラスタライザによって補間され、ピクセルシェーダ (PS) によって各ピクセルに対して、入射光ベクトルが出力される。

```

struct VS_OUT {
    float4 Pos    : POSITION;
    float3 Tex    : TEXCOORD0;
};

VS_OUT VS(float4 Pos : POSITION,
          float4 Nor : NORMAL)
{
    VS_OUT Out = (VS_OUT)0;
    float3 tmpPos, tmpNor, v;
    float a;

    tmpPos = normalize(mul(Pos, T));
    tmpNor = mul(Nor, R);
    a = dot(-tmpPos, tmpNor);
    v = tmpPos + 2 * a * tmpNor;

    Out.Pos = mul(Pos, KT);
    Out.Tex = normalize(v);
    return Out;
}

float4 PS(VS_OUT In) : COLOR
{

```

```
float4 Col = 0;  
Col.rgb = In.Tex.xyz;  
return Col;  
}
```