

複合鏡を用いた仮想多視点カメラシステムにおける 単一参照点の観測に基づく線形外部キャリブレーション法

高橋 康輔^{1,a)} 宮田 明裕^{1,†1,b)} 延原 章平^{1,c)} 松山 隆司^{1,d)}

概要：平面鏡に映り込む物体の鏡像は、鏡によって生成された仮想カメラから観測した像である。このことから、1台の実カメラに対して複数の鏡を用いることで仮想的に多視点カメラシステムを構築することが可能である。この仮想カメラの位置姿勢は鏡の法線や実カメラからの距離といった鏡のパラメータに依存する。本研究ではこの鏡のパラメータを求める手法、すなわち仮想多視点カメラシステムにおける外部キャリブレーション法を提案する。本研究では、一枚の鏡の反射によって得られる反射像だけでなく、複数の鏡によって得られる物体の多重反射像を利用する。多重反射像は複数の鏡の反射によるものであるため、得られる像の三次元位置は鏡のパラメータに関して非線形な値となる。これに対し、本研究では多重反射像の二次元投影点に着目し、単一の参照点の投影点間に成り立つ幾何関係を利用することで線形に外部キャリブレーションを行う手法を提案する。実験ではシミュレーションデータおよび実データを用いて提案手法の有効性を確認した。

A Linear Extrinsic Calibration of Kaleidoscopic Imaging System from Single 3D Point

TAKAHASHI KOSUKE^{1,a)} MIYATA AKIHIRO^{1,†1,b)} NOBUHARA SHOHEI^{1,c)} MATSUYAMA TAKASHI^{1,d)}

1. はじめに

平面鏡に映り込む被写体の鏡像は、鏡によって生成された仮想カメラから観測した像である。このことから、1台の実カメラに対して複数の鏡を用いることで仮想的に多視点カメラシステムを構築することが可能である。これらの仮想カメラは内部パラメータが全て共通であること、および完全に同期しているという特性を持つため、ステレオ視 [2, 3, 9], shape-from-silhouette [1, 5, 13], 構造化光 [8, 15], および ToF [10] を用いた三次元形状計測だけでなく、reflectance analysis [6, 7, 14] など多視点カメラをシステムを利用するコンピュータビジョンのタスクに広く利用

されている。本稿ではこのような複数の平面鏡を用いた仮想多視点カメラシステムを **Kaleidoscopic Imaging System** (以下, **KLS**) と呼ぶこととする。本研究では KLS を用いて被写体の三次元形状計測などを行うことを想定し (図 1), KLS における仮想カメラの位置姿勢推定, すなわち外部キャリブレーションに取り組む。なお, 外部キャリブレーションでは精度および計算コストの観点から良い線形解を求めることが重要である。そのため, 本研究でも線形に外部キャリブレーションを行うことを目指す。

平面鏡によって生成される仮想カメラの位置姿勢は、平面鏡の法線および実カメラと平面鏡間の距離 (以下ではこれらを鏡パラメータと呼ぶ) に依存する。従来はチェスパターンなどの構造が既知の参照物体を設置し、参照物体の実像と鏡像の三次元位置から鏡ごとに鏡パラメータを求めていた [6, 12]。このとき、複数の鏡について独立に鏡パラメータを求めているため、三次元形状計測などにおいて多

¹ 京都大学大学院情報学研究科
Kyoto University

^{†1} 現在, 奈良先端科学技術大学院大学
Presently with Nara

^{a)} takahasi@vision.kyoto-u.ac.jp

^{b)} miyata@vision.kyoto-u.ac.jp

^{c)} nob@i.kyoto-u.ac.jp

^{d)} tm@i.kyoto-u.ac.jp

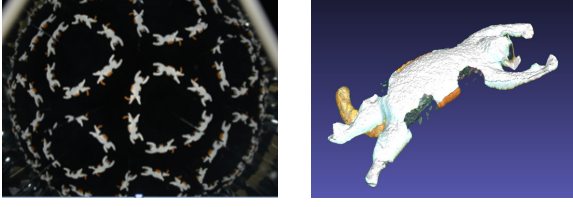


図1 Kaleidoscopic imaging system. Left: kaleidoscopic projection of a 3D cat object. Right: a 3D reconstruction result.

重反射像^{*1}を利用する時に不整合が発生する場合がある。一方、多重反射像を考慮する場合、多重反射像の三次元位置は鏡パラメータに関して非線形であるため、線形な拘束式が得られないという課題があった。

これらに対し、本研究では多重反射像の二次元投影点間で鏡パラメータに関して線形な幾何制約が成り立つことに着目し、単一参照点の多重反射像の二次元投影点から線形に外部キャリブレーションを実施する手法を提案する。

本稿の構成は以下のとおりである。2ではKLSに関する計測モデルについて述べる。3において二点の参照点から鏡パラメータを求める方法について述べ、続く4において単一の参照点から鏡パラメータを求める手法について述べる。5ではシミュレーションデータおよび実データを用いて提案手法を評価し、6において本研究の結論および課題について述べる。

2. Kaleidoscopic Imaging System

本節では本研究で用いる複合鏡を用いた仮想多視点カメラシステム (Kaleidoscopic Imaging System:KLS) の計測モデルについて述べる。

まず、単一の鏡の計測モデルに関して述べる。本稿では図2に示すように、カメラ座標系におけるある三次元点を p とし、法線 n かつカメラからの距離が d の鏡 π によって作り出された p の鏡像を p' とする。この時、 p および p' の画像平面への投影点を二次元座標値をそれぞれ q, q' とすると、これらは以下の式を満たす。

$$\lambda q = Ap, \quad \lambda' q' = Ap' \quad (1)$$

ただし、 A はカメラの内部パラメータから成る行列であり、これは既知であるとする。また、 λ と λ' はそれぞれの点の距離を表す。

これら p および p' は p と鏡の距離 t と鏡の法線 n を用いることで、

$$p = p' + 2tn \quad (2)$$

のように関係づけられ、さらに p' は

$$t + d = -n^\top \cdot p' \quad (3)$$

を満たす。ここで、式(2)および式(3)から

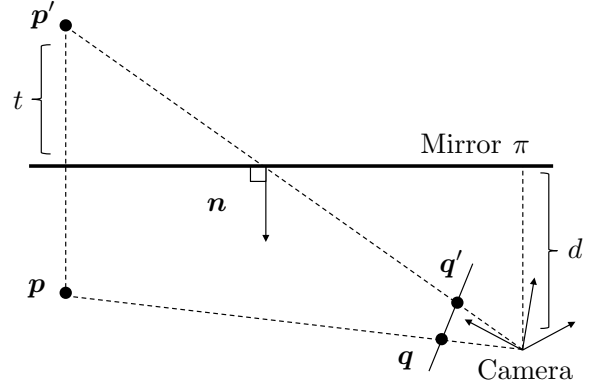


図2 Measurement model. A 3D point p is reflected to p' by a mirror π of normal n and distance d , and they are projected to q and q' respectively.

$$\tilde{p} = S\tilde{p}' = \begin{bmatrix} H & -2dn \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \tilde{p}' \quad (4)$$

が導ける。この S は鏡 π に関して鏡映変換を行う行列である。なお、 $H = I_{3 \times 3} - 2nn^\top$ は 3×3 のHouseholder行列である。また、 $\tilde{x}$ は x の同次座標系における座標値を表す。

KLSは複数の鏡を用いているため、図3に示すように複数回平面鏡によって反射した像が得られる。これらの像は反射の回数および反射経路に基づいて図4に示すように画像上の $chambers M_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ 内に投影される。

M_0 は被写体を直接観測した像が投影されており、この $chamber$ を $base chamber$ と呼ぶ。また、平面鏡 π_1, π_2 および π_3 による反射像が投影される $chamber$ をそれぞれ M_1, M_2 および M_3 とする。さらに、鏡 π_j を鏡 $\pi_i (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$ で反射することで得られる仮想的な鏡を π_{ij} とすると、この鏡 π_{ij} に関して以下の式が成り立つ。

$$S_{ij} = S_i S_j, \quad (5)$$

$$H_{ij} = H_i H_j$$

この S_{ij} によって変換された点は鏡 π_j および π_i によって二回反射された点であり、この点は図4における M_{ij} に投影される。同様に、三回反射以降の鏡映変換は以下のように表される。

$$\Pi_{k=1}^m S_{i_k} \quad (i_k = 1, 2, 3, i_k \neq i_{k+1}) \quad (6)$$

なお、 m は反射の回数を表す。

このように、各 $chamber$ に投影される像は鏡によって生成された仮想的なカメラから観測した像に他ならず、これら仮想カメラの外部パラメータは各鏡の法線やカメラ中心との距離に依存する。このことから、本稿における外部キャリブレーションの目的は各鏡のパラメータである法線 n_i およびカメラ中心との距離 d_i を求めることである。

*1 鏡像をさらに鏡で折り返した像

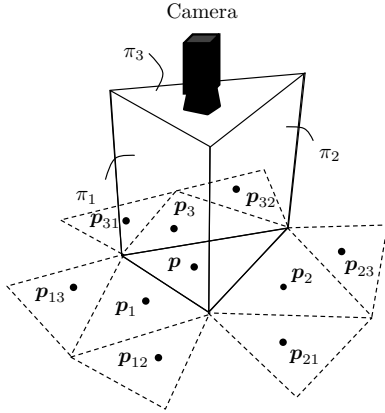


図3 Kaleidoscopic imaging system. A 3D point p is reflected to p_1 , p_2 and p_3 by the mirrors π_1 , π_2 and π_3 respectively.

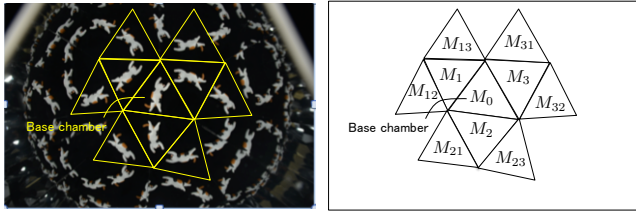


図4 Chamber arrangement

3. 二点の参照点を利用した単一鏡ごとの外部キャリブレーション

エビポーラ幾何 [4, 17] に基づくと、三次元空間中のある点 p とその鏡像 p' およびその鏡像を生成する鏡の法線 n は同一平面上に存在するため、以下の関係式を満たす。

$$(n \times p)^\top p' = 0 \quad (7)$$

この式は p および p' をそれぞれ $\lambda A^{-1}q$ と $\lambda' A^{-1}q'$ で置き換えることで、以下のように書き換えられる。

$$q^\top A^{-\top} [n]_\times^\top A^{-1} q' = 0 \quad (8)$$

なお、 $[n]_\times$ は 3×3 の歪対称行列を表し、これはエビポーラ幾何における基礎行列 (Essential Matrix) である [17]。

ここで、 q および q' をそれぞれ $(x, y, 1)^\top = A^{-1}q$, $(x', y', 1)^\top = A^{-1}q'$ のように正規化画像座標系で表すと、式 (8) は以下のように書き表せる。

$$\begin{pmatrix} xy' - x'y & x - x' & y - y' \end{pmatrix} n = 0 \quad (9)$$

式 (9) より、2 点の参照点およびその鏡像があれば鏡の法線 n が求まることがわかる。この時、 n は単位ベクトルであり、かつカメラに正対していることから一意に求まる。

4. 単一参照点を利用した複数鏡の外部キャリブレーション

第3節で述べたアルゴリズムでは、実鏡 π_i 、あるいは仮想鏡 π_{ij} に関して鏡ごとと独立にパラメータを求めることが

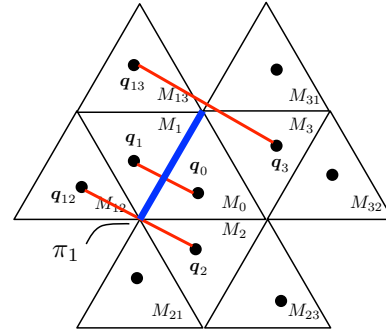


図5 Corresponding points. Three pairs $\langle q_0, q_1 \rangle$, $\langle q_2, q_{12} \rangle$ and $\langle q_3, q_{13} \rangle$ (red) are available or mirror π_1 (blue)

できる。しかしながら、仮想鏡は実鏡を複数回反射させることで得られるため、観測ノイズが含まれる実環境下では、このように独立に求めた鏡パラメータでは一貫性が保たれず、三次元復元などで不整合を発生させる場合がある。

これに対し、本節では鏡ごとにパラメータを求めるのではなく、単一の参照点の鏡像間に成り立つ関係を利用することで、実鏡および仮想鏡が拘束し合いつつ線形に解く方法について述べる。なお、以下では簡単のため三枚の鏡 π_i , ($i = 1, 2, 3$) を用い、かつ多重反射像として二回反射までを用いて説明するが、それぞれ容易に拡張可能である。

4.1 法線の推定

ある三次元点 p_0 が base chamber に q_0 として投影され、 p_0 が鏡 π_i によって反射された点 p_i は chamber M_i 内の q_i として投影されるとする。同様に、二次反射以降に関しても、鏡 π_{ij} によって反射された点 p_{ij} は chamber M_{ij} 内の点 q_{ij} として投影される。

ここで、 $p_1 = S_1 p_0$ が成り立つ時、 q_0 および q_1 は式 (9) を満たしており、この式は3で述べたように鏡 π_1 の法線 n_1 に関して制約を与えている。加えて $p_2 = S_2 p_0$ が成り立つならば、 $S_1 p_2 = S_1 S_2 p_0 \Leftrightarrow p_{12} = S_1 p_2$ が得られる。この式は、 p_2 と p_{12} が鏡 π_1 に関して一回反射の関係にあることを示している。すなわち、それらの投影像である q_2 と q_{12} は法線 n_1 に関して式 (9) を満たす。同様に、 $p_3 = S_3 p_0$ が成り立つとき、 q_3 および q_{13} は n_1 に関して式 (9) を満たす。これらの制約から、法線 n_1 は以下の式を解くことで求められる。

$$\begin{bmatrix} x_0 y_1 - x_1 y_0 & x_0 - x_1 & y_0 - y_1 \\ x_2 y_{12} - x_{12} y_2 & x_2 - x_{12} & y_2 - y_{12} \\ x_3 y_{13} - x_{13} y_3 & x_3 - x_{13} & y_3 - y_{13} \end{bmatrix} n_1 = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (10)$$

法線 n_2 および n_3 に関しても同様に、

$$\begin{bmatrix} x_0 y_2 - x_2 y_0 & x_0 - x_2 & y_0 - y_2 \\ x_3 y_{23} - x_{23} y_3 & x_3 - x_{23} & y_3 - y_{23} \\ x_1 y_{21} - x_{21} y_1 & x_1 - x_{21} & y_2 - y_{21} \end{bmatrix} n_2 = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (11)$$

および

$$\begin{bmatrix} x_0 y_3 - x_3 y_0 & x_0 - x_3 & y_0 - y_3 \\ x_1 y_3 - x_3 y_1 & x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ x_2 y_3 - x_3 y_2 & x_2 - x_3 & y_2 - y_3 \end{bmatrix} \mathbf{n}_3 = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (12)$$

を解くことで求められる。

このアルゴリズムの重要な性質に、(1) 多重反射を利用しながらも線形で解けることと、(2) それぞれの鏡ごとに推定した法線が、互いに拘束しあっているということがある。

(1) に関しては、通常鏡面反射は式 (4) で表されるように鏡パラメータから成る行列 S の線形変換で表される。しかしながら、参照点の多重反射を考慮した場合には式 (5) で表されるように非線形変換となってしまうため、線形で解くことはできなかった。一方、この多重反射の投影点は、上で述べたように式 (9) によって線形に関係づけられるため、多重反射を線形式の形で利用することができる。

(2) に関しても同様であり、上記の $\mathbf{q}_{12}, \mathbf{q}_2$ および $\mathbf{n}_1$ に関する制約式 (10) では $\mathbf{p}_2 = S_2 \mathbf{p}_0$ が満たされることを想定しているが、これは $\mathbf{n}_2$ に関する制約式である式 (11) の一行目の $(A^{-1} \mathbf{q}_2 \times A^{-1} \mathbf{q}_0)^\top \mathbf{n}_2 = 0$ から得られる。逆に、式 (10) から $\mathbf{n}_1$ を求めることは式 (11) および式 (12) において $\mathbf{p}_1 = S_1 \mathbf{p}_0$ であることを暗黙的に要請している。

4.1.1 距離の推定

参照点 $\mathbf{p}_i$ が $\mathbf{q}_i$ に投影されるという透視投影の関係から、これらの間には以下のような同一直線性の制約が存在する。

$$(A^{-1} \mathbf{q}_i) \times \mathbf{p}_i = \mathbf{x}_i \times \mathbf{p}_i = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (13)$$

ただし、 $\mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} x_i & y_i & 1 \end{pmatrix}^\top$ は $\mathbf{q}_i$ の正規化画像座標系における座標値である。

この時、式 (4) を変形することで以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i \times \mathbf{p}_i &= \mathbf{x}_i \times (H_i \mathbf{p}_0 - 2d_i \mathbf{n}_i) \\ &= [\mathbf{x}_i]_\times \begin{bmatrix} H_i & -2\mathbf{n}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ d_i \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{aligned} \quad (14)$$

二次反射像 $\mathbf{p}_{ij}$ も同様にその投影点 $\mathbf{q}_{ij}$ と同一直線であるため、

$$\begin{aligned} (A^{-1} \mathbf{q}_{ij}) \times \mathbf{p}_{ij} &= [\mathbf{x}_{ij}]_\times (H_i \mathbf{p}_j - 2d_i \mathbf{n}_i) \\ &= [\mathbf{x}_{ij}]_\times (H_i (H_j \mathbf{p}_0 - 2d_j \mathbf{n}_j) - 2d_i \mathbf{n}_i) \\ &= [\mathbf{x}_{ij}]_\times \begin{bmatrix} H_i H_j & -2\mathbf{n}_i & -2H_i \mathbf{n}_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ d_i \\ d_j \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{aligned} \quad (15)$$

が得られる。

これらの制約を用い、 $\mathbf{p}_0, d_1, d_2$ および d_3 に関して以下の線形式が得られる。

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} [\mathbf{x}_0]_\times & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{h}_1 & -2[\mathbf{x}_1]_\times \mathbf{n}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{h}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 1} & -2[\mathbf{x}_2]_\times \mathbf{n}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{h}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & -2[\mathbf{x}_3]_\times \mathbf{n}_3 \\ \mathbf{h}'_{1,2} & -2[\mathbf{x}_{12}]_\times \mathbf{n}_1 & -2\mathbf{h}''_{1,2} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{h}'_{2,1} & -2[\mathbf{x}_{21}]_\times \mathbf{n}_2 & -2\mathbf{h}''_{2,1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{h}'_{2,3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & -2[\mathbf{x}_{23}]_\times \mathbf{n}_2 & -2\mathbf{h}''_{2,3} \\ \mathbf{h}'_{3,2} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & -2[\mathbf{x}_{32}]_\times \mathbf{n}_3 & -2\mathbf{h}''_{3,2} \\ \mathbf{h}'_{3,1} & -2\mathbf{h}''_{3,1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & -2[\mathbf{x}_{31}]_\times \mathbf{n}_3 \\ \mathbf{h}'_{1,3} & -2\mathbf{h}''_{1,3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & -2[\mathbf{x}_{13}]_\times \mathbf{n}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \\ &= K \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{30 \times 1} \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、 $\mathbf{h}_i = [\mathbf{x}_i]_\times H_i$, $\mathbf{h}'_{i,j} = [\mathbf{x}_{ij}]_\times H_i H_j$, $\mathbf{h}''_{i,j} = [\mathbf{x}_{ij}]_\times H_i \mathbf{n}_j$ である。ここで、 $K^\top K$ の最小固有値に対応する固有ベクトルを計算することで、 $(\mathbf{p}_0, d_1, d_2, d_3)^\top$ が求まる。なお、本稿ではスケールは $d_1 = 1$ として正規化した。

以上、線形に鏡パラメータを推定する手法について述べた。通常外部キャリブレーションでは線形解を初期値として再投影誤差を最小化するように非線形最適化することで解を高精度化する。以下ではその最適化について述べる。

4.2 Kaleidoscopic bundle adjustment

第4節で線形に求められた法線 $\mathbf{n}_i$ および距離 d_i ($i = 1, 2, 3$) を用い、以下の式を解くことで参照点の三次元座標 $\mathbf{p}_0^*$ が求められる。

$$K' \mathbf{p}_0^* = -K'' \mathbf{d} \quad (17)$$

なお、 $\mathbf{p}_0^* = -(K'^\top K')^{-1} K'^\top K'' \mathbf{d}$ であり、 $\mathbf{d} = (d_1, d_2, d_3)^\top$ である。また、 K' は K の1～3列目の行列であり、 K'' は K の4～7列目の行列である。この三次元点 $\mathbf{p}_0^*$ を各 chamber へ再投影することで以下のような再投影誤差を定義する。

$$\begin{aligned} E(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, d_1, d_2, d_3) &= \left[\mathbf{q}_0 - \hat{\mathbf{q}}_0, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \mathbf{e}'_{1,2}, \mathbf{e}'_{2,1}, \mathbf{e}'_{2,3}, \mathbf{e}'_{3,2}, \mathbf{e}'_{3,1}, \mathbf{e}'_{1,3} \right]^\top \\ &= \mathbf{0}_{10 \times 1} \end{aligned} \quad (18)$$

ただし、 $\mathbf{e}_i = \mathbf{q}_i - \hat{\mathbf{q}}_i$ であり、 $\mathbf{e}'_{i,j} = \mathbf{q}'_{i,j} - \hat{\mathbf{q}}'_{i,j}$ である。この $\|E(\cdot)\|^2$ を最小化する $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, d_1, d_2, d_3$ を、鏡パラメータの最適解とする。

5. 実験

本節ではシミュレーションデータおよび実データを用い、

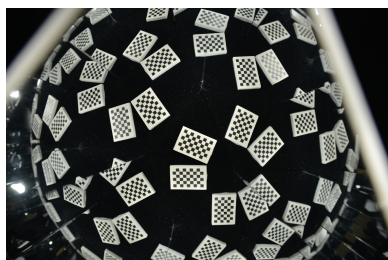


図6 A capture of a chessboard used as the reference object for conventional methods

従来の二手法と比較することで提案手法の有効性を示す。比較手法としては、[6, 12] で用いられている参照点の実像と鏡像の三次元点を利用した手法 (以下、Baseline と呼ぶ) と、Takahashi ら [16] が提案する鏡像間の直交制約を利用したものを用いる。なお、比較手法は参照物体として図6に示すチェスボードのように構造が既知のものを用いる必要が有ることに注意されたい。

5.1 シミュレーションデータを用いた実験

本実験では観測ノイズの存在する環境下において、各手法で推定した鏡パラメータ (法線および距離) と再投影誤差を評価する。なお、法線の評価は真値との Riemannian 距離を用い、距離の評価は L-1 ノルムを用いた。なお、本実験では図9に示すような3枚の平面鏡から成る仮想多視点カメラシステムを想定する。

図7に、異なる観測ノイズに対する各手法の推定誤差の平均値を示し、図8に異なる参照点の数を用いたときの各手法の推定誤差の平均値を示す。なお、 σ_q は平均0のガウシアンノイズにおける標準偏差値を表し、 N_p は参照点の数を表す。各ノイズレベルおよび点の数において100回試行した。また、表10にグラフ内のラインと各手法の対応を示す。なお、本実験では各手法の線形解および非線形解に関して評価したが、Baseline および Takahashi ら [16] の線形解は誤差が大きかったため記載していない。

これらの結果から、(1) 提案手法は単一参照点の線形解 (深緑のライン) でも従来手法と同等の精度で推定が可能であり、(2) 同じ参照点の数を利用する場合、従来手法に比べて提案手法の線形解および非線形解 (赤およびマゼンタのライン) は高精度に推定されていることがわかる。

5.2 実データを用いた実験

本実験では実データを用いて各手法の評価を行った。カメラは Nikon D600 を用い、内部パラメータ A は事前に [18] の手法で求めた。入力として、図6に示すようにチェスボードを設置して撮影した画像を用いた。

図11に各手法で推定した鏡の法線と距離を示す。図では各手法は概ね同じ結果を出力しているが、再投影誤差に関しては提案手法は 3.37pixels であり、Baseline および

Takahashi ら [16] ではそれぞれ 4.75, 13.6pixels であった。

また、さらに本実験では図9に示すように猫のオブジェクトを設置し、提案手法で推定した鏡パラメータを用いて三次元形状を復元した。なお、プロジェクタ (MicroVision SHOWMX+ Lase Pico Projector) は対応点を与えるために用い、図9左のようにオブジェクトを網羅するようにラインを投影した^{*2}。結果を図12に示す。図12から、オブジェクトの三次元形状が復元できていることが確認できる。

以上の結果から、提案手法は実環境においても三次元形状復元などのアプリケーションに用いることが出来る精度で鏡パラメータを推定できることが確認できた。

6. 結論

本研究では複合鏡を用いた仮想多視点カメラシステムにおいて、単一の参照点から線形に外部キャリブレーションを実施する手法を提案した。提案手法では従来手法と異なり、参照点の構造を必要とすること無く鏡パラメータを推定した。また、一枚の鏡の反射によって得られる反射像だけでなく、複数の鏡によって得られる多重反射像を利用することで、少ない参照点でも高精度な推定を実現した。

なお、本研究では chambaeer のセグメンテーションや参照点の投影像がそれぞれの chamber に属するかは事前に与えられているものとしたが、このセグメンテーションや割当問題 [11] は容易ではなく、これらを自動的に行う手法については今後検討する。

参考文献

- [1] Forbes, K., Nicolls, F., Jager, G. D. and Voigt, A.: Shape-from-silhouette with two mirrors and an uncalibrated camera, *Proc. of ECCV* (2006).
- [2] Gluckman, J. and Nayar, S. K.: Catadioptric Stereo Using Planar Mirrors, *IJCV*, Vol. 44, No. 1, pp. 65–79 (2001).
- [3] Goshtasby, A. and Gruver, W. A.: Design of a single-lens stereo camera system, *Pattern Recognition*, Vol. 26, No. 6, pp. 923 – 937 (1993).
- [4] Hartley, R. I. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press (2000).
- [5] Huang, P.-H. and Lai, S.-H.: Contour-Based Structure from Reflection, *Proc. of CVPR*, Vol. 1, pp. 379–386 (2006).
- [6] Ihrke, I., Reshetouski, I., Manakov, A., Tevs, A., Wand, M. and Seidel, H.-P.: A kaleidoscopic approach to surround geometry and reflectance acquisition, *CVPR Workshop on Computational Cameras and Displays*, pp. 29–36 (2012).
- [7] Inoshita, C., Tagawa, S., Mannan, M. A., Mukaigawa, Y. and Yagi, Y.: Full-dimensional Sampling and Analysis of BSS-RDF, *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 5, pp. 119–123 (2013).
- [8] Lanman, D., Crispell, D. and Taubin, G.: Surround structured lighting: 3-D scanning with orthographic illumination, *CVIU*, pp. 1107–1117 (2009).
- [9] Nene, S. A. and Nayar, S. K.: Stereo with mirrors, *Proc. of ICCV*, pp. 1087–1094 (1998).

^{*2} このプロジェクタは外部キャリブレーションを行う必要は無いことに注意されたい

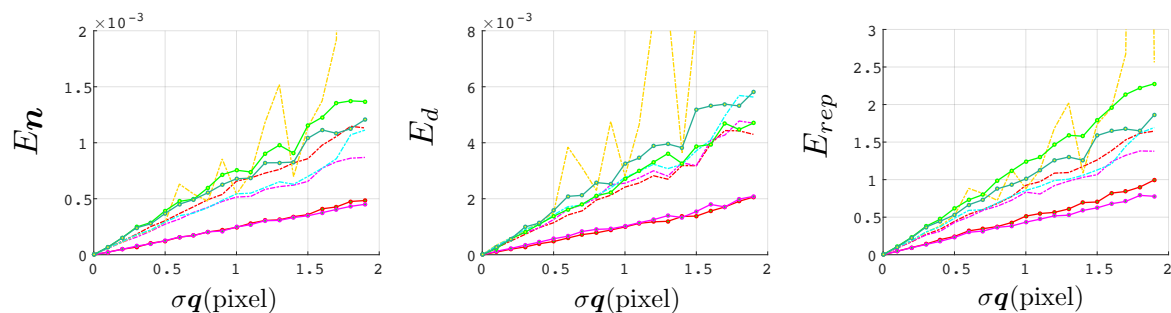


図 7 Estimation errors at different noise levels σ_q . Legends are provided in Table 10.

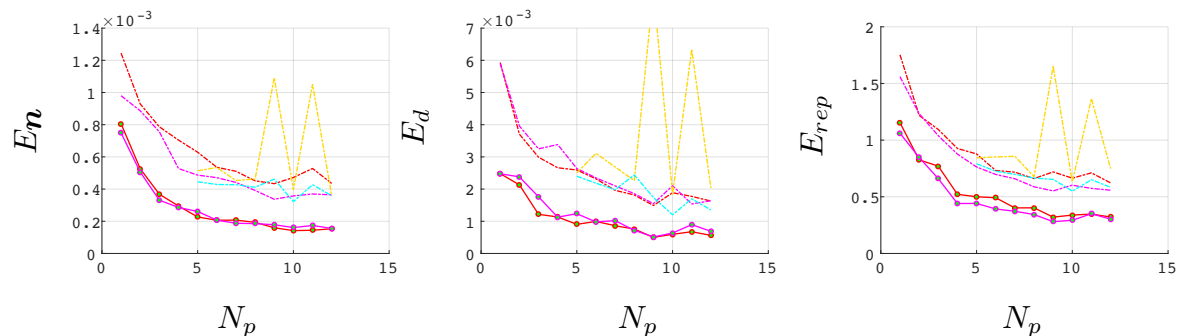


図 8 Estimation errors at different numbers of reference points N_p . Legends are provided in Table 10.

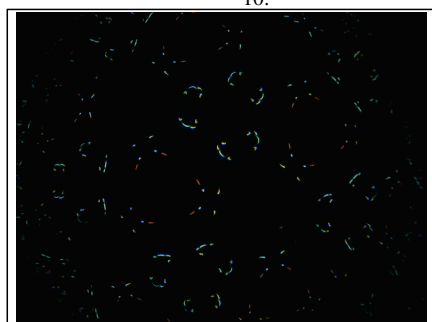
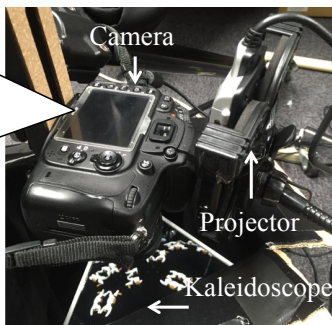


図 9 Capture setup



Line	Method	Model	Bundle Adjustment	Point
—	Proposed	Non-planar	-	5
—	Proposed	Non-planar	✓	5
- - -	Proposed	Planar	-	5
- - -	Proposed	Planar	✓	5
—	Proposed	-	-	1
—	Proposed	-	✓	1
- - -	Takahashi et al.	Planar	✓	5
- - -	Baseline	Planar	✓	5

図 10 Configurations

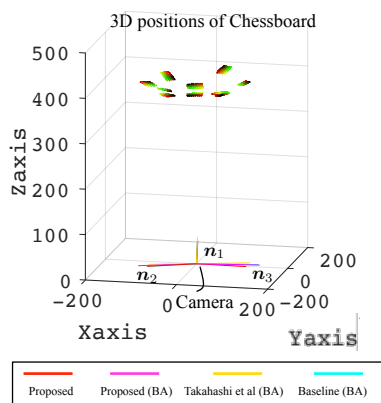


図 11 Calibration results. The colored lines in the bottom illustrate dn (the foot of perpendicular from the camera center) of each mirrors. The 10 patterns in the top illustrate the 3D points estimated by PnP.

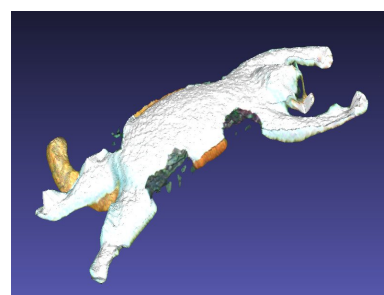


図 12 Reconstructed 3D shape

[10] Nobuhara, S., Kashino, T., Matsuyama, T., Takeuchi, K., and Fujii, K.: A Single-shot Multi-path Interference Resolution for Mirror-based Full 3D Shape Measurement with a

Correlation-based ToF Camera, *Proc. of 3DV* (2016).

[11] Reshetouski, I., and Ayush Bhandari, A. M., Raskar, R., Seidel, H.-P. and Ihrke, I.: Discovering the Structure of a Planar Mirror System from Multiple Observations of a Single Point, *Proc. of CVPR*, pp. 89–96 (2013).

[12] Reshetouski, I. and Ihrke, I.: *Mirrors in Computer Graphics, Computer Vision and Time-of-Flight Imaging*, pp. 77–104, Springer Berlin Heidelberg (2013).

[13] Reshetouski, I., Manakov, A., Seidel, H.-P. and Ihrke, I.: Three-Dimensional Kaleidoscopic Imaging, *Proc. of CVPR*, pp. 353–360 (2011).

- [14] Tagawa, S., Mukaigawa, Y. and Yagi, Y.: 8-D reflectance field for computational photography, *Proc. of ICPR*, pp. 2181–2185 (2012).
- [15] Tahara, T., Kawahara, R., Nobuhara, S. and Matsuyama, T.: Interference-Free Epipole-Centered Structured Light Pattern for Mirror-Based Multi-view Active Stereo, *Proc. of 3DV*, pp. 153–161 (2015).
- [16] Takahashi, K., Nobuhara, S. and Matsuyama, T.: A new mirror-based extrinsic camera calibration using an orthogonality constraint, *Proc. of CVPR*, pp. 1051–1058 (2012).
- [17] Ying, X., Peng, K., Hou, Y., Guan, S., Kong, J. and Zha, H.: Self-Calibration of Catadioptric Camera with Two Planar Mirrors from Silhouettes, *TPAMI*, Vol. 35, No. 5, pp. 1206–1220 (2013).
- [18] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *TPAMI*, Vol. 22, pp. 1330–1334 (1998).