Vol.2012-CVIM-180 No.25
2012/1/19

参照物体の鏡像を用いた線形外部キャリブレーション法

高 橋 康 輔[†1] 延 原 章 平[†1] 松 山 隆 司[†1]

カメラからキャリブレーション対象である参照物体が直接撮影できないという制約のもと，鏡を用いることで得られる参照物体の鏡像を利用し，カメラに対する参照物体の位置 · 姿勢を線形に求める手法を提案する．

従来手法ではカメラの鏡像に焦点を当てた立式を行なっている一方，本手法では参照物体の鏡像に焦点を当てた立式を行うことで，より多くの制約式を得ることができる．本稿ではキャリブレーション手順の導出を述べると共に，シミュレーションデータ及び実データを用いた実験において従来手法と比較を行い，本手法の有効性を確認した．

A New Linear Extrinsic Camera Calibration using Mirrored Images

Kosuke Takahashi,[†1] Shohei Nobuhara[†1]
and Takashi Matsuyama[†1]

In this paper, we propose a new method of extrinsic camera calibration from 3D reference objects observed via mirrors.

The key contribution of this paper is to present a new scheme to compute the extrinsic parameters by solving a large system of linear equations. While conventional algorithms focus on the position of virtual cameras, our method utilizes the virtual position of reflected reference objects. This allows us to obtain more constraint equations which contribute to make the calibration more robust.

We demonstrate the advantages of the proposed method against a state-of-the-art by qualitative and quantitative evaluations using synthesized and real data.

†1 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Infomatics Kyoto University

1. 序 論

カメラは物体の 3 次元形状の計測 [1,2]，視覚情報を用いたロボットのナビゲーション [3,4] や拡張現実感 (Augumented Reality:AR) [5] など様々なアプリケーションに利用されている．これらのように実カメラで撮影された画像データに対して幾何学的な解析を行うためには，カメラモデルを設定してカメラの内部パラメータと外部パラメータを決定するカメラキャリブレーションを行うことが必要である．

カメラキャリブレーションはコンピュータビジョンの基礎となる問題であり，外部キャリブレーションに関するもののみでもこれまで多くの研究がなされてきた [6,7]．これら既存の外部キャリブレーションに関する手法の多くはカメラがキャリブレーション対象である物体 (以下，参照物体と呼ぶ) を直接観測できる位置関係にあることを想定している．例えば Zhang [7] は平面上に分布する特徴点を参照物体とし，これをカメラで撮影することで両者の位置関係を求める手法を提案した．

しかしながら，カメラと外部キャリブレーションを行う参照物体が必ずしもカメラの視野にあるとは限らない．その例としてラップトップコンピュータに付属したカメラとそのディスプレイの位置関係を求めたい場合，視野を共有しない全方位カメラにおいて各カメラ間の位置関係を求めたい場合，そしてカメラから得られる画像をもとに動作するロボットにおけるカメラとその視野にない部位の位置関係を求めたい場合などが挙げれられる．このように「参照物体がカメラの視野にない」という状況に対し，鏡を用いることで外部キャリブレーションを行う手法が存在する [8–14]．これらの手法ではカメラの視野に参照物体の鏡像が入るように鏡を動かし，その鏡像からカメラと参照物体のキャリブレーションを行う．

本研究ではこの「参照物体がカメラの視野にない」という制約のもと，鏡を用いた外部キャリブレーションに焦点を当てる．今回我々は参照物体に対し複数の特徴点を参照点として設定し，鏡が相異なる 3 つの姿勢をとることで得られる参照点の鏡像 (以下，仮想点と呼ぶ) を用いてカメラと参照物体の外部パラメータを求めることを目指す (図 1)．

本研究で提案するアルゴリズムは既知である仮想点の 3 次元座標を入力とし，カメラと参照物体間の外部パラメータを出力する．従来の手法ではカメラの鏡像 (以下，仮想カメラと呼ぶ) に焦点を当てた立式を行なっていたが，本手法では仮想点に関して立式を行うことでより多くの制約式を用いた線形解法を実現した．実験ではシミュレーションデータと実データを用い，本手法によって推定された外部パラメータと従来の手法によって推定された外部パラメータを比較することで本手法がノイズに対してより頑健であることを確認した．

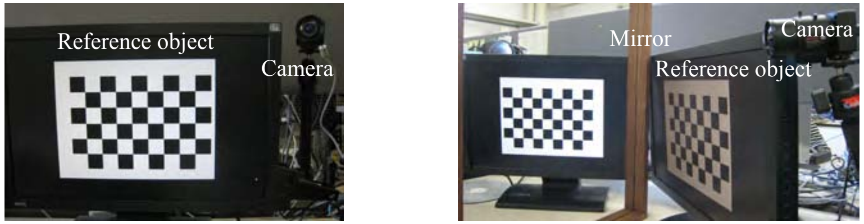

図 1 左図の位置関係にある参照物体とカメラに対し右図のように鏡を用いてキャリブレーションを行う.

本稿の構成は以下のとおりである．２章で鏡を用いたカメラと参照物体の外部キャリブレーションに関する従来研究について述べ，それらを分類することで本研究の位置を明らかにする．続く３章では鏡による幾何制約から外部パラメータをもとめる手法について述べる．4 章ではシミュレーションと実データを用いて本手法の有効性を示すと共に，従来手法と比較を行う．最後に 5 章で本研究の結論を述べる．

2. 関 連 研 究

本章では平面の鏡を用いた外部カメラキャリブレーション法の従来研究について述べる.

鏡を用いたカメラと参照物体の外部キャリブレーションは大きく分けて (1) 鏡の位置姿勢が既知, (2) 鏡の位置姿勢が未知なものに分けることができる. (1) では鏡に対してマーカを添付することでその位置姿勢を求める [8] [9] [15]. Jang ら [8] は鏡にマーカを添付し, それらから消失点を推定することで鏡の位置姿勢を求め, 物体の 3 次元形状の計測を行なった.

(2) では鏡にマーカを添付せず, 鏡を動かすことでその位置姿勢を推定するものである. 各手法において必要な鏡の姿勢の数とそれぞれ何に着目して制約を得ているかについて表 1 にまとめた. Kumar ら [11] は実カメラと仮想カメラの座標系の軸が満たす幾何学的関係に着目し, 鏡を 5 姿勢用いることで線形に外部パラメータを求める手法を提案した. Rodorigues ら [12] は各仮想カメラはある軸に関して回転の関係にあることを利用した立式を行い, 鏡を 3 姿勢用いることで外部キャリブレーションを行っている. また, Hesch ら [13] は仮想カメラと参照点間で P3P 問題を解くことでそれらの外部パラメータを計算し, その結果を用いて実カメラと参照物体との外部キャリブレーションを実現している. これらの手法は全て仮想カメラの位置姿勢に基づいて得られる制約式を用いている.

表 1 外部キャリブレーションを行うために必要な鏡の姿勢の数と制約を得る際の着目点

	鏡の姿勢の数	着目点
Sturm and Bonfort [10]	3	仮想カメラ
Rodorigues *etal.* [12]	3	仮想カメラ
Kumar *etal.* [11]	5	仮想カメラ
Hesch *etal.* [13]	3	仮想カメラ
Proposed	3	仮想点

今回我々が提案する手法は (2) 鏡の位置姿勢が未知な状態における外部キャリブレーションに属する. 我々は仮想カメラを想定せず, 仮想点にのみ着目した立式を行う. これにより, 鏡の姿勢を固定した状態においても参照点の数を増やすことで, 外部パラメータを求める式においてより多くの制約式を用いることができるという利点がある.

次章では鏡による幾何制約について述べた後, 本手法のアルゴリズムについて説明する.

3. 参照物体の鏡像を用いた外部カメラキャリブレーション

本章では異なる 3 姿勢の鏡を用いることで得られる仮想点の 3 次元座標を入力として，カメラとその視野に無い参照物体間の外部キャリブレーションを行う手法について述べる．

3.1 鏡による幾何制約と計測モデル

本研究では図 2 のように，カメラを C，用いる鏡を π_j $(j = 1,2,3)$ とする．座標系 $\{y\}$ における点 $\boldsymbol{p}$ の座標値を ${}^{y}\boldsymbol{p}$ と表すとすると，参照物体 X 上の N 点の参照点は ${}^{X}\boldsymbol{p}^{i}$ $(i = 1, \cdots, N)$ と表せる．これらの値は参照物体 X の座標系 $\{X\}$ における座標値であることから予め任意に定めることができる．これらの参照点をカメラ C の座標系 $\{C\}$ に変換する回転行列を $\boldsymbol{R}$，並進ベクトルを $\boldsymbol{T}$ とすると，カメラ座標系 $\{C\}$ における参照点 ${}^{C}\boldsymbol{p}^{i}$ は以下のように表される．

$$ {}^{C}\boldsymbol{p}^{i} = \boldsymbol{R} \cdot {}^{X}\boldsymbol{p}^{i} + \boldsymbol{T} \quad (i = 1, \cdots, N), \tag{1} $$

このとき，i 番目の参照点 ${}^{C}\boldsymbol{p}^{i}$ の仮想点，つまり鏡 π_j の Householder 変換[⋆1]によって得られる点を ${}^{C}\boldsymbol{p}^{i}_{j}$ と表す．本研究の目標は式 (1) における外部パラメータ $\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{T}$ を求めることである．

各参照点 ${}^{C}\boldsymbol{p}^{i}$ から鏡 π_j に対する距離を t^{i}_{j} とし，カメラ座標系 $\{C\}$ の原点から鏡 π_j に対する距離を d_j とおくと，図 2 よりカメラ座標系 $\{C\}$ における参照物体上の参照点 ${}^{C}\boldsymbol{p}^{i}$

⋆1 後述．鏡映変換とも言う．

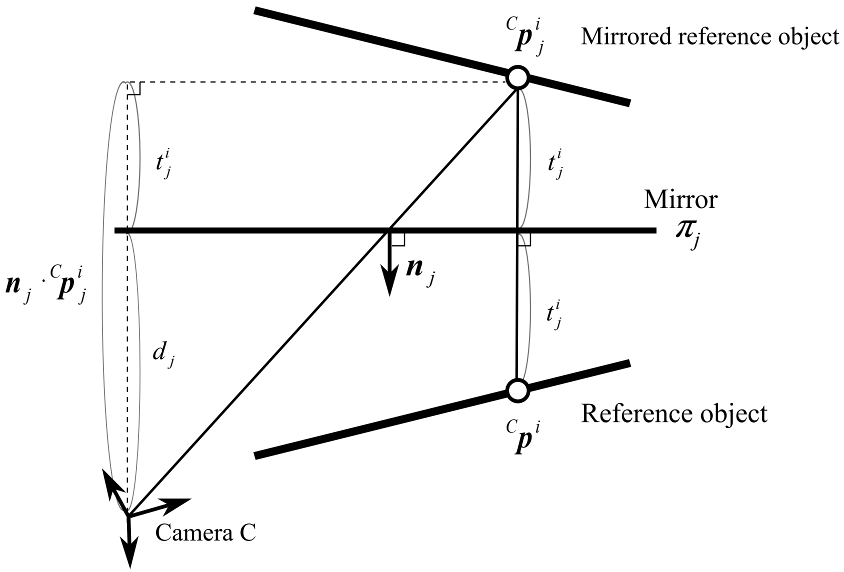

図 2 計測モデル

は次のように表される．

$$^{C}\boldsymbol{p}^{i} = 2t_j^i \boldsymbol{n}_j + {}^{C}\boldsymbol{p}_j^i. \tag{2}$$

さらに，t_j^i と d_j は以下の関係式を満たす．

$$t_j^i + d_j = -\boldsymbol{n}_j^\top \cdot {}^{C}\boldsymbol{p}_j^i. \tag{3}$$

この二式から t_j^i を削除することで $^{C}\boldsymbol{p}^i$ は以下のように表すことができる．

$$^{C}\boldsymbol{p}^{i} = -2(\boldsymbol{n}_j^\top \cdot {}^{C}\boldsymbol{p}_j^i + d_j)\boldsymbol{n}_j + {}^{C}\boldsymbol{p}_j^i. \tag{4}$$

これは参照点 $^{C}\boldsymbol{p}^i$ と鏡 π_j によるその鏡像 $^{C}\boldsymbol{p}_j^i$ 間の関係を表しており，一般に Householder 変換として知られている．さらにこの式 (4) と式 (1) から，以下の式が得られる．

$$\boldsymbol{R} \cdot {}^{X}\boldsymbol{p}^{i} + \boldsymbol{T} = -2(\boldsymbol{n}_j^\top \cdot {}^{C}\boldsymbol{p}_j^i + d_j)\boldsymbol{n}_j + {}^{C}\boldsymbol{p}_j^i. \tag{5}$$

この式 (5) が本研究における基本的な計測モデルとなる．

3.2 鏡の法線ベクトルの導出

相異なる 2 姿勢の鏡 π_j，$\pi_{j'}$ $(j \neq j')$ を考える．この 2 つの平面が交差する直線に平行なベクトルを鏡 π_j と鏡 $\pi_{j'}$ の軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}$ とすると，この軸ベクトルは各鏡の法線 $\boldsymbol{n}_j, \boldsymbol{n}_{j'}$ に直交することから $\boldsymbol{m}_{jj'} = \boldsymbol{n}_j \times \boldsymbol{n}_{j'}$ と表せる．

また，この軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}$ はある参照点 $^{C}\boldsymbol{p}$ に対しそれぞれの鏡について Householder 変換が施された点 $^{C}\boldsymbol{p}_j, {}^{C}\boldsymbol{p}_{j'}$ を結んだベクトルに対して直交する．つまり，以下の関係を満たす．

$$({}^{C}\boldsymbol{p}_j - {}^{C}\boldsymbol{p}_{j'})^\top \cdot \boldsymbol{m}_{jj'} = 0. \tag{6}$$

この関係はすべての対応する仮想点間に関して成り立つ．ここで，式 (6) を N 点の参照点に対する仮想点 $^{C}\boldsymbol{p}_j^i, {}^{C}\boldsymbol{p}_{j'}^i, (i = 1, \cdots, N, j \neq j)$ に用い，以下のようにまとめる．

$$\begin{pmatrix} ({}^{C}\boldsymbol{p}_j^1 - {}^{C}\boldsymbol{p}_{j'}^1)^\top \\ ({}^{C}\boldsymbol{p}_j^2 - {}^{C}\boldsymbol{p}_{j'}^2)^\top \\ \vdots \\ ({}^{C}\boldsymbol{p}_j^N - {}^{C}\boldsymbol{p}_{j'}^N)^\top \end{pmatrix} \boldsymbol{m}_{jj'} = \boldsymbol{Q}_{jj'}\boldsymbol{m}_{jj'} = 0. \tag{7}$$

さらに，$\boldsymbol{Q}_{jj'}^\top$ を式 (7) の両辺に掛けることで以下の式が得られる．

$$\boldsymbol{Q}_{jj'}^\top \boldsymbol{Q}_{jj'}\boldsymbol{m}_{jj'} = \boldsymbol{M}_{jj'}\boldsymbol{m}_{jj'} = 0. \tag{8}$$

このとき，$\boldsymbol{M}_{jj'}$ は 3×3 の半正定値行列である．また，カメラ座標 $\{C\}$ における仮想点 $^{C}\boldsymbol{p}_j^i$，$(i = 1, \cdots, N, j = 1, 2, 3)$ の 3 次元座標は既知であることから $\boldsymbol{M}_{jj'}$ は直接求めることができる．したがって，軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}$ は行列 $\boldsymbol{M}_{jj'}$ の固有値 0 に対する固有ベクトルとして求められる．ただし，実際にキャリブレーションを行うときにはノイズが発生することがあるため，必ずしも行列 $\boldsymbol{M}_{jj'}$ の固有値が 0 になるとは限らない．そのような場合には行列 $\boldsymbol{M}_{jj'}$ の最小の固有値に対応する固有ベクトルとして軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}$ が求められる．

また，相異なる 3 姿勢の鏡 $\pi_j, \pi_{j'}, \pi_{j''} (j \neq j', j \neq j'', j' \neq j'')$ を考えた時，軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}$ は法線 $\boldsymbol{n}_j, \boldsymbol{n}_{j'}$ に直交し，軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj''}$ は法線 $\boldsymbol{n}_j, \boldsymbol{n}_{j''}$ に直交する．これらの関係は，法線 $\boldsymbol{n}_j$ は 2 つの軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}, \boldsymbol{m}_{jj''}$ に直交することを示しており，以下の式で表される．

$$\boldsymbol{n}_j = \frac{\boldsymbol{m}_{jj'} \times \boldsymbol{m}_{jj''}}{\| \boldsymbol{m}_{jj'} \times \boldsymbol{m}_{jj''} \|} \tag{9}$$

なお，この際図 2 のように鏡の法線ベクトルの Z 成分が負になるように符号を調整する．

以上より，3 姿勢の鏡を用いて観測された仮想点の 3 次元座標から，各鏡の姿勢の法線べ

クトル $\boldsymbol{n}_1, \boldsymbol{n}_2, \boldsymbol{n}_3$ が求められる．

3.3 外部パラメータの導出

今，N 点ある仮想点のカメラ座標系における３次元座標 ${}^C\boldsymbol{p}_j^i$ に加え，各鏡の法線ベクトル $\boldsymbol{n}_j$ が既知である．これらを式 (5) に代入して整理することで以下の線形式が得られる．

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{B}, \tag{10}$$

ただし，

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 & 2\boldsymbol{n}_1 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & x_1\boldsymbol{I}_3 & y_1\boldsymbol{I}_3 \\ \boldsymbol{I}_3 & 2\boldsymbol{n}_1 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & x_2\boldsymbol{I}_3 & y_2\boldsymbol{I}_3 \\ & & \vdots & & & \\ \boldsymbol{I}_3 & 2\boldsymbol{n}_1 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & x_N\boldsymbol{I}_3 & y_N\boldsymbol{I}_3 \\ \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & 2\boldsymbol{n}_2 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & x_1\boldsymbol{I}_3 & y_1\boldsymbol{I}_3 \\ \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & 2\boldsymbol{n}_2 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & x_2\boldsymbol{I}_3 & y_2\boldsymbol{I}_3 \\ & & \vdots & & & \\ \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & 2\boldsymbol{n}_2 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & x_N\boldsymbol{I}_3 & y_N\boldsymbol{I}_3 \\ \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & 2\boldsymbol{n}_3 & x_1\boldsymbol{I}_3 & y_1\boldsymbol{I}_3 \\ \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & 2\boldsymbol{n}_3 & x_2\boldsymbol{I}_3 & y_2\boldsymbol{I}_3 \\ & & \vdots & & & \\ \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & 2\boldsymbol{n}_3 & x_N\boldsymbol{I}_3 & y_N\boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}^\top & d_1 & d_2 & d_3 & \boldsymbol{r}_1^\top & \boldsymbol{r}_2^\top \end{bmatrix}^\top, \tag{12}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{b}_1^1 & \boldsymbol{b}_1^2 & \cdots & \boldsymbol{b}_1^N & \boldsymbol{b}_2^1 & \boldsymbol{b}_2^2 & \cdots & \boldsymbol{b}_2^N & \boldsymbol{b}_3^1 & \boldsymbol{b}_3^2 & \cdots & \boldsymbol{b}_3^N \end{bmatrix}^\top, \tag{13}$$

$$\boldsymbol{b}_j^i = (-2\boldsymbol{n}_j^\top {}^C\boldsymbol{p}_j^i \boldsymbol{n}_j + {}^C\boldsymbol{p}_j^i)^\top. \tag{14}$$

である．このとき，${}^X\boldsymbol{p}^i = (x_i, y_i, 0)^\top$ とおいても一般性失わない．また，$\boldsymbol{r}_1$, $\boldsymbol{r}_2$ はそれぞれ $\boldsymbol{R}$ の第一列，第二列の値を表す．つまり，$\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{r}_1\, \boldsymbol{r}_2\, \boldsymbol{r}_3)$ である．一般に鏡の姿勢の数が M，用いる参照点の数が N の時，式 (10) において未知変数の数は $9+M$ に対し，得られる制約式の数は $3 \times M \times N$ である．本研究では $M = 3$ としているので，未知変数の数は 12 であり，制約式の数は $9 \times N$ である．このことから $N \geq 2$，つまり用いる参照点の数が 2 点以上の時に式 (10) は $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{A}^*\boldsymbol{B}$ で解くことができる．ただし，$\boldsymbol{A}^*$ は $\boldsymbol{A}$ の擬似逆行列である．

しかし，この線形式を解くことで求まった $\boldsymbol{r}_1$ と $\boldsymbol{r}_2$ は回転行列の成分が満たすべき以下の制約を満たしているとは限らない．

$$\begin{aligned} &\mid \boldsymbol{r}_1 \mid = \mid \boldsymbol{r}_2 \mid = \mid \boldsymbol{r}_3 \mid = 1 \\ &\boldsymbol{r}_1^\top \boldsymbol{r}_2 = \boldsymbol{r}_2^\top \boldsymbol{r}_3 = \boldsymbol{r}_3^\top \boldsymbol{r}_1 = 0. \end{aligned} \tag{15}$$

そこで，一度式 (10) を解いた後，この制約式を満たすように以下の手順で $\boldsymbol{r}_1$ と $\boldsymbol{r}_2$ を修正する．

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{r}}_3 &= (\boldsymbol{r}_1 \times \boldsymbol{r}_2)/(\mid \boldsymbol{r}_1 \mid \cdot \mid \boldsymbol{r}_2 \mid), \\ \hat{\boldsymbol{r}}_2 &= (\hat{\boldsymbol{r}}_3 \times \boldsymbol{r}_1)/(\mid \hat{\boldsymbol{r}}_3 \mid \cdot \mid \boldsymbol{r}_1 \mid), \\ \hat{\boldsymbol{r}}_1 &= \boldsymbol{r}_1/\mid \boldsymbol{r}_1 \mid. \end{aligned} \tag{16}$$

ここで求められた $\hat{\boldsymbol{r}}_1, \hat{\boldsymbol{r}}_2, \hat{\boldsymbol{r}}_3$ を最終的な外部パラメータである回転行列 $\boldsymbol{R}$ とする．つまり，$\boldsymbol{R} = (\hat{\boldsymbol{r}}_1\, \hat{\boldsymbol{r}}_2\, \hat{\boldsymbol{r}}_3)$ である．

以上より，仮想点の３次元座標を入力とし，カメラと参照物体間の外部パラメータ $\boldsymbol{R}, \boldsymbol{T}$ を求めることができた．

4. 実　　験

本章では提案手法の有効性をシミュレーションデータと実データを用いて確認する．どちらの場合においても Hesch ら [13] の手法と比較を行った．Hesch らは求めた線形解を再投影誤差 (Reprojection Error) を最小化する最適化関数への初期値として用いているが，今回は最適化を行う前の線形解に対して評価を行う．また，Hesch らの手法では外部キャリブレーションを行うためには参照点の数が３点必要であることから，本実験でも参照点を３点用いる．

4.1 P3P 問題による複数解の存在

P3P 問題 [16] とはカメラ座標系において，ある３点の３次元点 ${}^C\boldsymbol{p}^i$，$(i = 1, 2, 3)$ の各点間の距離が既知である場合に，画像平面上におけるそれらの投影点の座標 $\boldsymbol{q}^i$ からそれらの３次元座標を求める問題である．本稿では入力として与える仮想点 ${}^C\boldsymbol{p}_j^i$，$(i, j = 1, 2, 3)$ の３次元座標は既知としていたが，Hesch らはそれらの投影点を用いて P3P 問題を解くことでその３次元座標を求め，入力として与えている．そのため，以降の実験で用いる ${}^C\boldsymbol{p}_j^i$ も Hesch らと同様にその投影点から計算した値を入力として与えることとする．

ただし，一般にこの P3P 問題は最大で４つの解が得られることが知られている．本手法でも Hesch らの手法 [13] でも３つの相異なる鏡の姿勢を用いており，そのそれぞれについ

て P3P 問題を解かなければならないことから最大で $4\times4\times4=64$ 通りの解の組み合わせが存在する．そのため，そのそれぞれの組み合わせに対して外部パラメータ $\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}$ を求めることができる．Hesch らはこの複数求まる外部パラメータの中から，それらを用いて計算した再投影誤差が最小になる外部パラメータを最終的に出力する外部パラメータとして選択している．そこで本手法でも Hesch らと同様に再投影誤差を最小化する外部パラメータを選択することとする．

4.2 シミュレーションデータを用いた評価

4.2.1 実験環境

今回シミュレーションを行う実験環境は以下のとおりである．まず，用いるカメラ C の内部パラメータとして以下の行列を与える．

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}487.911 & 0 & 324.313\\ 0 & 487.558 & 237.004\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \tag{17}$$

これは後の実データを用いた実験におけるカメラ C_1 の持つ内部パラメータと同じであることを述べておく．さらに，各鏡はそれぞれカメラからの距離が 300 の位置に設置した．また，ある鏡の法線 $\boldsymbol{n}_j$ が角度 $(\theta_x,\theta_y,\theta_z)$ に対して $(\cos\theta_x\cos\theta_y,\cos\theta_x\sin\theta_y,\sin\theta_z)$ として表されるとすると，$\boldsymbol{n}_1$ は $(-10,150,0)$，$\boldsymbol{n}_2$ は $(-40,180,0)$，$\boldsymbol{n}_3$ は $(20,210,0)$ として与える．3 点の参照点は参照物体座標系 $\{X\}$ において ${}^X\boldsymbol{p}^1=(0,0,0)^\top$，${}^X\boldsymbol{p}^2=(175,0,0)^\top$，${}^X\boldsymbol{p}^3=(0,0,100)^\top$ として与える．カメラと参照物体間の回転行列 $\boldsymbol{R}$ は単位行列として与え，並進ベクトル $\boldsymbol{T}$ はそれぞれの試行において各成分が 0~20 の範囲でランダムに値をとるよう定めた．

4.2.2 結　　果

我々の提案した手法と Hesch らの手法によって求められる外部パラメータ $\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{T}$，鏡の法線 $\boldsymbol{n}_j$，カメラと鏡の距離 d_j の精度を確認するため，上記で述べたセットアップのもとデータセットを用意し，それらに対する推定誤差と再投影誤差を計測した．ここで，まず回転行列 $\boldsymbol{R}$ に対する推定誤差は以下のように定めた．

$$E_R=(180/\pi)\arccos\min(\boldsymbol{r}_1\cdot\boldsymbol{r}_{g1},\ \boldsymbol{r}_2\cdot\boldsymbol{r}_{g2},\ \boldsymbol{r}_3\cdot\boldsymbol{r}_{g3}), \tag{18}$$

このとき，$\boldsymbol{r}_{g1}$，$\boldsymbol{r}_{g2}$，$\boldsymbol{r}_{g3}$ は ground truth として用意したデータセットにおける回転行列の各列の成分を表す．また，$\boldsymbol{T}$ に関する推定誤差は以下の式のように二乗平均平方根 (RMS) を用いる．

$$E_T=\sqrt{|\ \boldsymbol{T}-\boldsymbol{T}_g\ |^2/3}. \tag{19}$$

ただし，$\boldsymbol{T}_g$ は ground truth として用意したデータセットにおける並進ベクトルを表す．次に，鏡 π_j の法線 $\boldsymbol{n}_j$ に関する推定誤差 E_n は以下のように各鏡の法線に関する二乗平均平方根の平均を用いる．

$$E_n=\frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3}\sqrt{|\ \boldsymbol{n}_j-\boldsymbol{n}_{gj}\ |^2/3}. \tag{20}$$

ただし，$\boldsymbol{n}_{gj}$ は ground truth として用意された鏡 π_j の法線を表す．また，カメラと鏡 π_j の距離 d_j に関する推定誤差 E_d は以下のように各距離の平均を用いる．

$$E_d=\frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3}(\mathrm{abs}(d_j-d_{gj})) \tag{21}$$

このとき，d_{gj} は ground truth として用意されたカメラと鏡 π_j との距離を表す．さらに，再投影誤差は次のように定義する．

$$E_P=\sum_{j=1,2,3}\left(\sum_{i=1,2,3}(\check{\boldsymbol{q}}_j^i-\boldsymbol{q}_j^i)\right), \tag{22}$$

ここで $\boldsymbol{q}_j^i$ はデータセットとして用意された仮想点の画像平面上における投影点であり，$\check{\boldsymbol{q}}_j^i$ は提案手法によって推定された外部パラメータから仮想点の座標を求め，それらを内部パラメータ行列 $\boldsymbol{K}$ を用いて画像平面上に投影した点の座標である．

実験の結果を図 3 に表す．(a) の列はピクセルノイズに対する評価を行ったもである．ノイズは画像平面上における仮想点の投影点である $\boldsymbol{q}_j$ に対してガウシアンノイズを与えた．この際ガウシアンノイズは平均 0 に固定し，分散を $0\ldots2$ まで変動させた．(b) の列は鏡とカメラの距離に対する評価を行ったものである．鏡の距離は 200 から 500 まで変動させた．(c) の列は鏡の法線の角度の変動に対する評価を行ったものである．上記で設定した鏡の法線の角度を基準にして，それぞれ ±10 度まで変動させた．また，(b) と (c) においては平均 0，分散が 1 のガウシアンノイズを与えた．ピクセルノイズ，鏡とカメラの距離，鏡の法線の角度をそれぞれ独立に変動させ，変動させたそれぞれの値につき 20 回の試行を行った．各行は上からそれぞれ E_R，E_T，E_n，E_d，E_p の平均を表している．これらの結果から，本手法が Hesch ら [13] の手法に対して回転行列 $\boldsymbol{R}$ と鏡の法線 $\boldsymbol{n}_j$，さらには再投影誤差に関して精度が良いことが確認できる．

4.3 実データを用いた評価

実データを用いた実験のセットアップの概要を図 4 に示す．カメラは Point Grey 社製

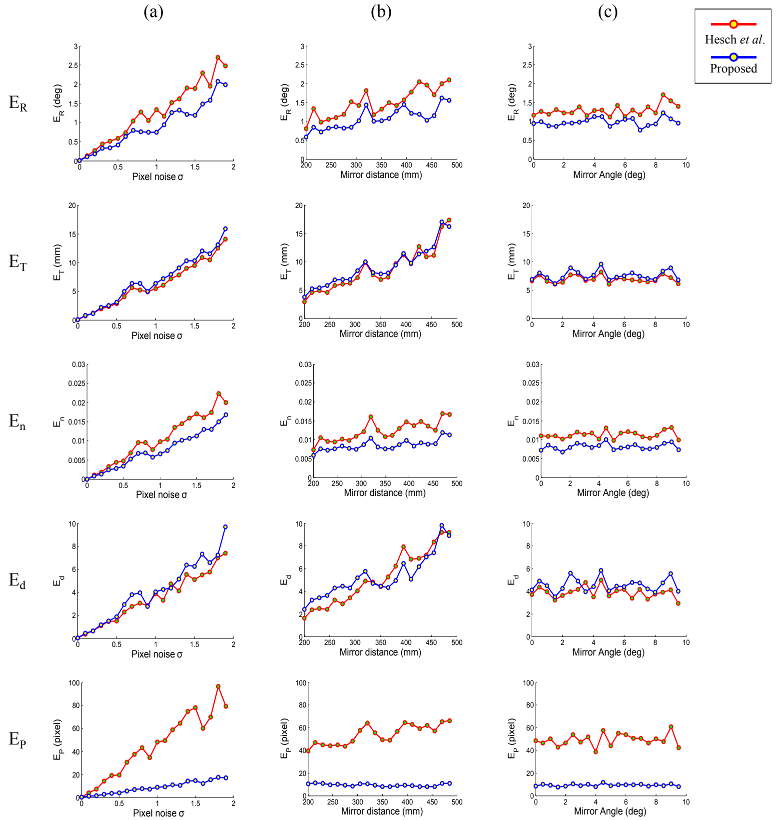

図 3 (a)∼(c) のパラメータを変化させた時の外部パラメータの推定誤差を比較．(a) ピクセルノイズ (b) 鏡とカメラの距離 (c) 鏡の法線の角度．ただし，(b),(c) においては平均 0，分散 1 のガウシアンノイズを与えている

の Chameleon CMLN01352C を用いた．図 4 にあるように，本実験ではこのカメラを 2 台 (C_1, C_2) と平面ディスプレイ，平面鏡を用いた．本実験の目標はカメラ C_1 とその視野にないディスプレイに提示された 5×8 のチェスパターン X_1 間の外部キャリブレーションを行うことである．カメラ C_1 は 3 姿勢の鏡 $\pi_j (j = 1, 2, 3)$ を用いて X_1 の鏡像を VGA 画像で獲得する．

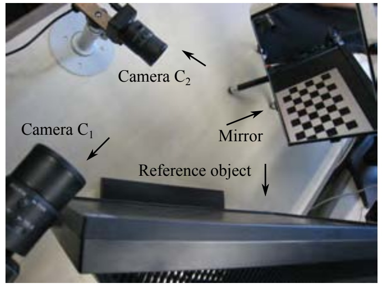

図 4 キャリブレーション環境

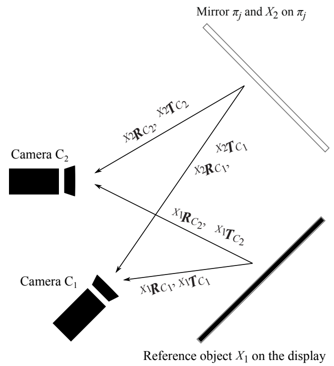

図 5 カメラとディスプレイ，鏡間の外部パラメータの関係

次に，その評価を行う基準の値として別の方法でカメラ C_1 とチェスパターン X_1 間の外部パラメータを求める．まずカメラ C_2 をチェスパターン X_1 と鏡を直接観測できる場所に設置する．ここでカメラ C_2 とチェスパターン X_1 は Zhang [7] の手法を用いることで外部パラメータを求めることができる．加えて，別のチェスパターン X_2 を鏡平面に添付することで二台のカメラ C_1，C_2 は鏡平面と同じ位置姿勢であるチェスパターン X_2 との外部キャリブレーションを行うことができる．

図 5 のように，座標系を $\{X_l\}$ から $\{C_k\}$ への変換を行う回転行列と並進ベクトルをそれぞれ ${}^{X_l}\boldsymbol{R}_{C_k}$，${}^{X_l}\boldsymbol{T}_{C_k}$ とすると，座標系 $\{X_l\}$ における 3 次元点 ${}^{X_l}\boldsymbol{p}^i$ はカメラ座標系 $\{C\}$ において以下のように表される．

$$ {}^{C_k}\boldsymbol{p}^i = {}^{X_l}\boldsymbol{R}_{C_k} \cdot {}^{X_l}\boldsymbol{p}^i + {}^{X}\boldsymbol{T}_{C_k} \; (k = 1, 2, \; l = 1, 2). \tag{23} $$

提案手法，もしくは Hesch らの手法で求まる外部パラメータはこの ${}^{X_1}\boldsymbol{R}_{C_1}$，${}^{X_1}\boldsymbol{T}_{C_1}$ である．さらに，Zhang の手法によって ${}^{X_1}\boldsymbol{R}_{C_2}$，${}^{X_1}\boldsymbol{T}_{C_2}$，${}^{X_2}\boldsymbol{R}_{C_1}$，${}^{X_2}\boldsymbol{T}_{C_1}$，${}^{X_2}\boldsymbol{R}_{C_2}$，${}^{X_2}\boldsymbol{T}_{C_2}$ を求め，これらを用いて以下のように ${}^{X_1}\boldsymbol{R}_{C_1}$，${}^{X_1}\boldsymbol{T}_{C_1}$ を表し，この外部パラメータを実データを用いた際の基準の値とする．

$$ \begin{aligned} {}^{X_1}\boldsymbol{R}_{C_1} &= {}^{X_2}\boldsymbol{R}_{C_1} \, {}^{X_2}\boldsymbol{R}_{C_2}^{\top} \, {}^{X_1}\boldsymbol{R}_{C_2} \\ {}^{X_1}\boldsymbol{T}_{C_1} &= {}^{X_2}\boldsymbol{R}_{C_1} \, {}^{X_2}\boldsymbol{R}_{C_2}^{\top} ({}^{X_1}\boldsymbol{T}_{C_2} - {}^{X_2}\boldsymbol{T}_{C_2}) + {}^{X_2}\boldsymbol{T}_{C_1}. \end{aligned} \tag{24} $$

図 6 に X_1 の仮想点 ${}^{C}\boldsymbol{p}_j^i$ に加え，提案手法と Hesch ら [13] の手法，式 (24) から求まっ

表 2　式 (24) に対する提案手法と Hesch ら [13] の手法の比較

	Hesch *et al.* [13]	Proposed
E_R (Eq (18))	4.21	1.28
E_T (Eq (19))	60.57	51.41
E_P (Eq (22))	19.01	2.93

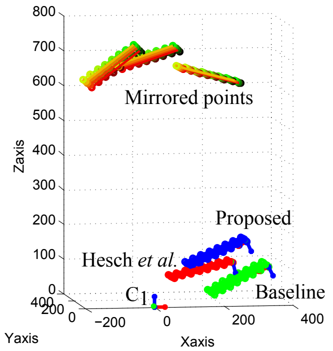

図 6　提案手法によって推定された参照物体の位置 (青). Hesch ら [13] によって推定された参照物体の位置 (赤). 式 (24) によって推定された参照物体の位置 (緑). 座標系はカメラ C_1 の座標系を用いている.

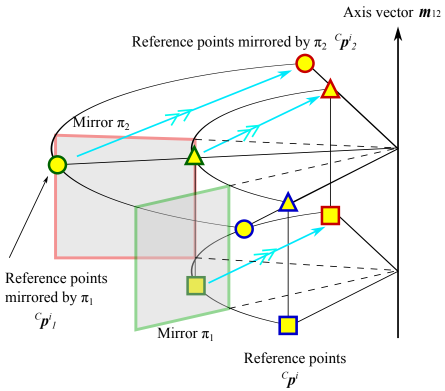

図 7　計算不可能な場合

たチェスパターン X_1 の位置を表す．なお，この図 6 はカメラ C_1 の座標系 $\{C_1\}$ で表されている．

表 2 に実データによる実験の量的評価の結果を示す．E_R と E_T は式 (24) を ground truth として求められたものであり，再投影誤差は実際に観測された画像上の座標値を ground truth として求められたものである．なお，実データを用いた実験は 5×8 のチェスパターンを利用しているが，提案手法と Hesch ら [13] の手法においては同一直線上にない 3 点のみを使用していることに注意されたい．結果から実データを用いた実験においても，Hesch ら [13] の手法に対して提案手法がより良い精度で推定していることが確認できる．

4.4 考　　察

4.4.1 計算可能性について

今回提案した手法は軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}$ (3.2 節) が計算できなければ，それ以降のアルゴリズムは適用できない．以下の場合，軸ベクトルが計算できないことがわかっている．(1) 図 7 のように，${}^{C}\boldsymbol{p}^{i}_{j} - {}^{C}\boldsymbol{p}^{i'}_{j}$ $(i \neq i',\ i, i' = 1, 2, 3)$ のベクトルに対して二姿勢の鏡の軸ベクトル $\boldsymbol{m}_{jj'}$ が平行，もしくは直交する時．これは軸ベクトルは存在するが，計算することができない．(2) 二枚の鏡が平行の時．これは軸ベクトルそのものが存在しないため，計算することができない．ただし，これらの場合は式 (8) における行列 $\boldsymbol{M}_{jj'}$ の rank が 2 であるか無いかによって検出することができる．

4.4.2 Hesch ら [13] の手法との比較

本研究ではシミュレーションデータと実データの両方を用いて Hesch ら [13] の手法と比較を行った．双方の結果から特に再投影誤差に関して提案手法が優れていると言え，この理由について考察する．再投影誤差の計算には外部パラメータ $\boldsymbol{R}, \boldsymbol{T}$ だけでなく，鏡の法線ベクトル $\boldsymbol{n}_j (j = 1, 2, 3)$，カメラと鏡の距離 d_j が用いられている．そこで，各手法によって推定されたパラメータの中でも，どのパラメータが再投影誤差に最も影響を与えているかを調べる．

図 3 の (a) で用いたデータに対して Hesch らの手法で推定された外部パラメータ $\boldsymbol{R}, \boldsymbol{T}$, 鏡の法線 $\boldsymbol{n}$，カメラと鏡の距離 d をそれぞれ ground truth に置き換えた場合の各ノイズレベルにおける再投影誤差の和 S_{E_p} とパラメータを置き換える前後における再投影誤差の変

表 3　VS_{E_P} について降順に並べ変えたもの．

置き換えるパラメータ	S_{E_P}	VS_{E_P}
$\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{n}$, d	167.52	722.32
$\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{n}$	192.70	697.13
$\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{n}$	233.62	656.21
$\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{T}$	1354.56	464.72
$\boldsymbol{T}$	1346.21	456.37
$\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{T}$, d	1318.18	428.34
$\boldsymbol{T}$, d	1307.96	418.12
$\boldsymbol{n}$, d	991.70	128.26
$\boldsymbol{n}$	976.26	124.25
$\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{n}$, d	975.00	123.83
$\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{n}$	956.90	121.39
d	867.79	22.05
$\boldsymbol{R}$, d	871.57	18.75
$\boldsymbol{R}$	890.45	2.61

化量の和 VS_{E_p} を比較する．それぞれの定義は以下のとおりである．

$$S_{E_P} = \sum_{l=1}^{L}(\{E_P^a\}_l) \tag{25}$$

$$VS_{E_P} = \sum_{l=1}^{L}(\mathrm{abs}(\{E_P^a\}_l - \{E_P^b\}_l)) \tag{26}$$

ただし E_P^b，E_P^a はそれぞれパラメータを置き換える前，置き換えた後の再投影誤差を表す．さらに，$\{E_P\}_l$ はノイズレベルの変化を L ステップに分けた場合，l ステップ目のノイズレベルにおける再投影誤差の値を表す．本実験では $L = 20$ とした．VS_{E_P} に関して降順に並べた結果を表 3 に示す．

表 3 から並進ベクトル $\boldsymbol{T}$，さらに法線ベクトル $\boldsymbol{n}$ が再投影誤差に対する影響が大きいことが確認できる．図 3 において提案手法と Hesch らの手法において並進ベクトル $\boldsymbol{T}$ に関する推定誤差 E_T は同様の結果を示している一方，図 3 では提案手法の方が法線ベクトルに関する推定誤差 E_n が小さいことを示している．これらのことから，この法線ベクトルの推定誤差の小ささが図 3 における再投影誤差に関して，提案手法が Hesch らの手法に対し優れている理由であると考えられる．

5. 結　　論

本稿ではカメラとその視野に無い参照物体との外部キャリブレーションを線形に行う手法を提案した．本手法では参照物体上の参照点の鏡像に着目した立式を行うことで，従来手法と比較してより多くの制約式を用いた解法を実現した．実験ではシミュレーションデータと実データの両方において従来手法と比較を行い，本手法の有効性を示した．

今後は 4.4 節で述べた計算不可能な場合について考察を深めると共に，用いる参照点の数の変化に対する外部パラメータの精度の変化についても調べていく．さらに，提案したキャリブレーション手法を用いて複数枚の鏡を用いた場合 [17] に対応することも考えている．

参 考 文 献

1) Kanade, T., Rander, P. and Narayanan, P.: Virtualized reality: constructing virtual worlds from real scenes, *Multimedia, IEEE*, Vol.4, No.1, pp.34 –47 (online), DOI:10.1109/93.580394 (1997).
2) Agarwal, S., Furukawa, Y., Snavely, N., Curless, B., Seitz, S. M. and Szeliski, R.: Reconstructing Rome, *IEEE Computer*, Vol. 43, pp. 40–47 (online), DOI:http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MC.2010.175 (2010).
3) Desouza, G. and Kak, A.: Vision for mobile robot navigation: a survey, *TPAMI*, Vol.24, No.2, pp.237 –267 (2002).
4) Fraundorfer, F., Scaramuzza, D. and Pollefeys, M.: A constricted bundle adjustment parameterization for relative scale estimation in visual odometry, *In Proc.of ICRA*, pp.1899 –1904 (online), DOI:10.1109/ROBOT.2010.5509733 (2010).
5) Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. and MacIntyre, B.: Recent advances in augmented reality, *Computer Graphics and Applications, IEEE*, Vol.21, No.6, pp.34 –47 (online), DOI:10.1109/38.963459 (2001).
6) Hartley, R.I. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, second edition (2004).
7) Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, *TPAMI*, pp.1330–1334 (2000).
8) Jang, K.H., Lee, D.H. and Jung, S.K.: A moving planar mirror based approach for cultural reconstruction: Research Articles, *Comput. Animat. Virtual Worlds*, Vol.15, pp.415–423 (2004).
9) Lébraly, P., Deymier, C., Ait-Aider, O. and E.Royer, M.D.: Flexible extrinsic calibration of non-overlapping cameras using a planar mirror: Application to vision-based robotics, *In Proc.of IROS*, pp.5640–5647 (2010).
10) Sturm, P. and Bonfort, T.: How to Compute the Pose of an Object without a Direct View, *In Proc.of ACCV*, pp.21–31 (2006).
11) Kumar, R., Ilie, A., Frahm, J.-M. and Pollefeys, M.: Simple calibration of non-overlapping cameras with a mirror, *In Proc.of CVPR*, pp.1–7 (2008).
12) Rodrigues, R., Barreto, P. and Nunes, U.: Camera Pose Estimation Using Images of Planar Mirror Reflections, *In Proc.of ECCV*, pp.382–395 (2010).
13) Hesch, J. A., Mourikis, A. I. and Roumeliotis, S. I.: *Algorithmic Foundation of Robotics VIII*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 57, chapter Mirror-Based Extrinsic Camera Calibration, pp. 285–299 (online), DOI:10.1007/978-3-642-00312-7_18, Springer-Verlag (2009).
14) Nayar, S.: Catadioptric omnidirectional camera, *In Proc. of CVPR*, pp.482–488 (1997).
15) Gluckman, J. and Nayar, S.: Planar catadioptric stereo: geometry and calibration, *In Proc.of CVPR*, pp.1022–1028 (1999).
16) Haralick, B.M., Lee, C.-N., Ottenberg, K. and Nölle, M.: Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem, *IJCV*, Vol.13, pp. 331–356 (1994).
17) Hesch, J.A., Mourikis, A.I. and Roumeliotis, S.I.: Extrinsic Camera Calibration using Multiple Reflections, *In Proc.of ECCV* (2010).