

## カメラを回転させた時の特徴点軌跡を用いた魚眼カメラの内部パラメータ推定 -モデルと評価関数の変更による改良-

○ 田中祐輝 †, 増山岳人 ‡, 梅田和昇 ‡

○ Yuki TANAKA †, Gakuto MASUYAMA ‡, Kazunori UMEDA ‡

†: 中央大学大学院 理工学研究科, y.tanaka@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

‡: 中央大学 理工学部, {masuyama, umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

<要約> 魚眼カメラの内部パラメータを推定する手法は存在するが、その多くが特別なターゲットを必要とする。そこで、本研究では3次元空間中の特徴点を用いることで、特別なターゲットを用いずに、簡便に魚眼カメラの内部パラメータを推定する手法を提案する。本論文では従来の提案手法の魚眼カメラモデルと評価関数を変更することにより、手法の改良を行った。シミュレーション実験により、本改良手法の有用性を示す。

<キーワード> 魚眼カメラ, 内部パラメータ推定, キャリブレーション

### 1. 序論

魚眼カメラは、外界情報を取得するセンサとして広く利用されている。このカメラは超広画角であり、一度に広範囲のセンシングが可能である。そのため、自動車の視界支援システムや監視用途等の低コストで広範囲の計測が求められるセンサシステムを構築するのに有効である。しかし、魚眼カメラから得られる画像（以降、魚眼画像とする）は特有の歪を有している。この歪を除去した画像を生成するために透視投影変換を行う場合など、魚眼画像に画像処理を適用する際には正確なカメラの内部パラメータを求めることが重要である。魚眼カメラの内部パラメータを推定する研究は存在するが、特別なターゲットを必要とする場合が多く、手間がかかる。Scaramuzzaらの手法[1]では内部パラメータを推定するためにチェッカーパターンを魚眼カメラに複数回提示する必要がある。また、ターゲットの提示の仕方や回数により結果がばらつくことが考えられる。そこで本研究ではキャリブレーション用のターゲットを用いず、図1のように実環境中でカメラを鉛直軸周りに回転させることで得られる特徴点の軌跡情報を用いて魚眼カメラの内部パラメータを推定する手法を提案している[2]。本研究で

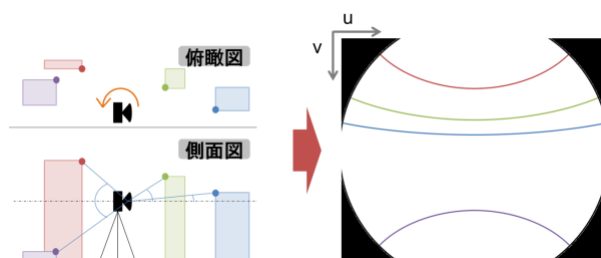


図1 特徴点軌跡の生成

は、ターゲットを提示する必要がなく、簡便に内部パラメータを求めることが可能である。

従来の提案手法では求めたい内部パラメータと同時に特徴点の3次元位置も推定していた。そのため、一方の推定結果によって他方の推定結果が変化することにより、精度や安定性に課題が残っていた。そこで、本論文ではカメラモデルを変更し、評価関数を再構築した。推定するパラメータを減らすことにより、精度向上を図る。

### 2. 魚眼カメラの内部パラメータ

本論文ではScaramuzzaらが提案している汎用的な全方位カメラモデル[1]を用いる。ある3次元点のカメラ座標系における位置  $\mathbf{P} = [X \ Y \ Z]^T$  とその点が画像上に投影される画像左上が原点

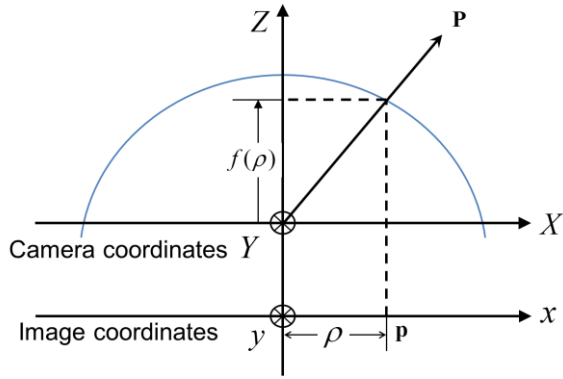


図2 3次元点の射影

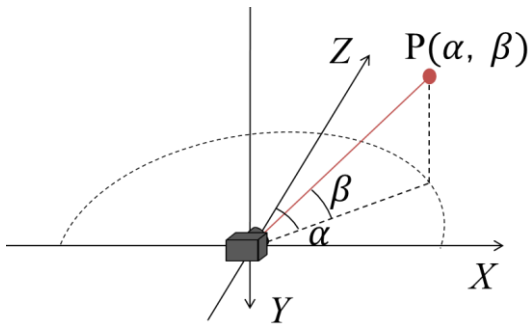


図3 3次元点の定義

の画像座標における位置  $\mathbf{p} = [u \ v]^T$ , 画像中心  $\mathbf{p}_0 = [u_0 \ v_0]^T$  の対応関係は図2のようになり、次式で表される。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ -f(\rho) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\approx$  は同次座標として等しいことを表す。

$\rho = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2}$  は投影点  $\mathbf{p}$  の画像中心  $\mathbf{p}_0$  からの距離である。また、 $f(\rho)$  は  $\rho$  の多項式であり、次式のように表される。

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4 + \dots \quad (2)$$

本論文では、4次の項までの係数をカメラの内部パラメータとする。画像中心  $u_0, v_0$  を含め、本論文で推定する内部パラメータ  $\mathbf{I}$  を以下の通りとする。

$$\mathbf{I} = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ u_0 \ v_0]^T \quad (3)$$

また、本研究ではカメラの回転を利用することから、図3のように3次元点  $\mathbf{P}$  を方位角  $\alpha$  と仰角  $\beta$  で定義する。この時、式(1)より投影点  $\mathbf{p}$  は以下のようになる。

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tan\alpha \cdot f(\rho) + u_0 \\ \sqrt{\tan^2\alpha + 1} \cdot \tan\beta \cdot f(\rho) + v_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3. 内部パラメータ推定手法

#### 3.1 評価関数の最小化による推定

本論文では推定するパラメータ数を少なくすることで推定精度の向上を目指す。そのため、式(4)から  $\alpha$  を消去することで以下の拘束式を得る。

$$v - v_0 + \sqrt{(u - u_0)^2 + f^2(\rho, \mathbf{I})} \cdot \tan\beta = 0 \quad (5)$$

カメラを回転させた時の観測点  $\mathbf{p}_{fi} = [u_{fi} \ v_{fi}]^T$  の  $u_{fi}$  を式(5)に代入し、 $v$  について解く。その解を再投影点  $\mathbf{p}_{ri} = [u_{ri} \ v_{ri}]^T$  の  $v$  座標  $v_{ri}$  とする。ここで  $u_{ri} = u_{fi}$  である。観測点  $\mathbf{p}_{fi}$  と再投影点  $\mathbf{p}_{ri}$  の  $v$  座標の差の2乗和を評価関数  $E$  として以下のように定義する。

$$E = \sum_{i=1}^N (v_{fi} - v_{ri})^2 \quad (6)$$

$N$  は観測点数である。評価関数  $E$  は観測点  $\mathbf{p}_{fi}$  と内部パラメータ  $\mathbf{I}$ , 特徴点の仰角  $\beta$  によって表される。観測点  $\mathbf{p}_{fi}$  は魚眼画像から得られるため、最適化手法により評価関数  $E$  を最小とする内部パラメータ  $\mathbf{I}$  を求める。特徴点の仰角  $\beta$  は次節で示す通り、繰り返し計算を行い、更新をする。

#### 3.2 推定の流れ

3.1 節で示した通り、評価関数  $E$  は観測点  $\mathbf{p}_{fi}$  と内部パラメータ  $\mathbf{I}$ , 特徴点の仰角  $\beta$  の関数である。評価関数の最小化により内部パラメータ  $\mathbf{I}$  を推定し、仰角  $\beta$  を式(5)により再計算する。推定の流れを図4に示す。

最初に内部パラメータ  $\mathbf{I}$  の初期値を決定する。内部パラメータ  $\mathbf{I}$  の  $a_0 \sim a_4$  は手動で適当な値を設定する。 $u_0$  と  $v_0$  は各軌跡の対称性から計算をする。本論文では、まず、各軌跡を2次近似する。2次曲線の頂点の  $u$  座標の平均を  $u_0$  とする。また、2次の係数と頂点の  $v$  座標をプロットし、線形近似することで2次の係数が0となる  $v$  を求め、その値を  $v_0$  とする。

次に内部パラメータ  $\mathbf{I}$  を既知として式(5)を  $\beta$  について解く。1本の軌跡上の観測点は同一の  $\beta$  である。よって、軌跡上の全点の  $\beta$  の平均をその軌跡の  $\beta$  とする。得られた  $\beta$  を用いて式(6)の評価関数  $E$  を最小化するように内部パラメータ  $\mathbf{I}$  を推定する。この仰角  $\beta$  と内部パラメータ  $\mathbf{I}$  を求める手順を繰り返し、各値を更新する。また、収束を安定させるため、推定する内部パラメータの数と種類を

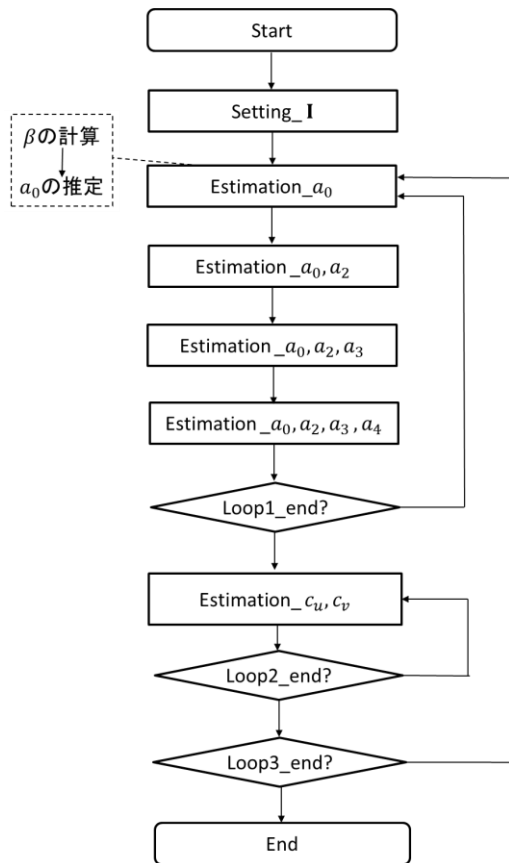


図4 推定の流れ

変更しながらこの繰り返しを進める。本論文において設定した反復計算の流れと推定するパラメータは図4に示している。各ループに収束条件を設け、すべてのループが終了するまでに評価関数  $E$  を最小とした内部パラメータ  $\mathbf{I}$  を推定結果とする。

## 4. シミュレーション実験

シミュレーション画像を用いて内部パラメータ推定を行い、本研究の有用性を検証した。画像は既存のパラメータ推定手法[1]によって求めた実機の内部パラメータを用いて生成した。また、実際に特徴点の軌跡画像を得る際には必ず計測誤差が生じる。そこで、計測誤差を想定したシミュレーション画像を用いて推定を行うことで計測誤差の影響を検証した。

### 4.1 実験条件

カメラの光軸が水平面と平行な状態で光学中心周りに水平面上で回転すると仮定し、シミュレーション画像を生成した。また、特徴点の計測誤差

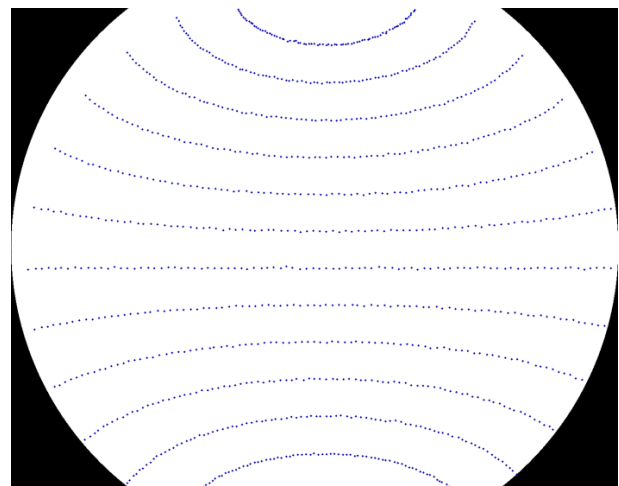


図5  $\sigma = 1.0$ のシミュレーション画像の1例

表1  $a_0 \sim a_4$ の初期値

| $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| -100  | 0     | 0     | 0     | 0     |

による影響を検証するため、各投影点の  $u, v$  座標それぞれに平均  $0.0$ 、標準偏差  $\sigma = 0.0, 0.5, 1.0, 2.0$  の正規分布に従う乱数を加えた。各設定について10回の実験を行った。実験に用いた画像の1例を図5に示す。各画像内の観測点数は820点であった。また、 $a_0 \sim a_4$ の初期値を表1に示す。 $v_0$ の初期値を安定して求めるために、使用する軌跡を経験的に画像中心に近い4本とした。

### 4.2 実験結果

各誤差において10回実験を行ったときの推定された内部パラメータと最終的な評価関数の値それぞれの平均を表2に、それらの標準偏差を表3に示す。また、実験終了時の観測点  $\mathbf{p}_{fi}$  と再投影点  $\mathbf{p}_{ri}$  の1例を図6に示す。図6は画像の右上のみを示している。青色の点が投影点  $\mathbf{p}_{fi}$ 、赤色の矩形が再投影点  $\mathbf{p}_{ri}$  である。表2, 3の画像中心  $u_0, v_0$  をみると、どの実験においても推定値の平均と真値との差が  $1[\text{pixel}]$  以内であり、計測誤差が大きくなって安定して推定できていることがわかる。また、 $\sigma = 0.0$  のとき評価関数が0でないのは内部パラメータと同時に特徴点の仰角  $\beta$  を計算しているため、真値ではない内部パラメータの局所最適解に収束したためだと考えられる。

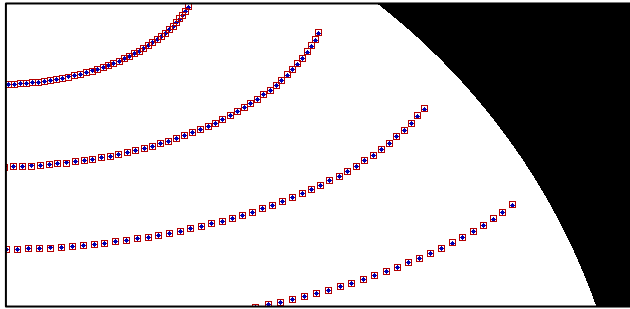
歪を表す係数である  $a_0 \sim a_4$  は1つの関数の係数

表 2 推定された内部パラメータと評価関数それぞれの真値と平均

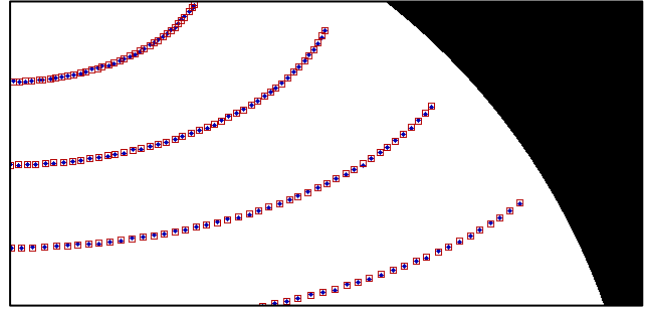
|                           | 真値      | $\sigma = 0.0$ | $\sigma = 0.5$ | $\sigma = 1.0$ | $\sigma = 2.0$ |
|---------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $a_0$                     | -391.58 | -391.40        | -386.92        | -385.47        | -385.83        |
| $a_1$                     | 0       | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| $a_3(\times 10^{-4})$     | 9.57    | 9.63           | 7.71           | 6.31           | 6.36           |
| $a_3(\times 10^{-7})$     | -6.12   | -6.6           | -0.13          | 5.38           | 5.58           |
| $a_4(\times 10^{-9})$     | 1.14    | 1.21           | 0.66           | 0.05           | 0.4            |
| $u_0$ [pixel]             | 689.61  | 689.60         | 689.10         | 689.38         | 689.23         |
| $v_0$ [pixel]             | 569.30  | 570.01         | 569.93         | 569.73         | 570.00         |
| $E$ [pixel <sup>2</sup> ] | ---     | 32.70          | 749.81         | 1508.91        | 8120.03        |

表 3 推定された内部パラメータと評価関数それぞれの標準偏差

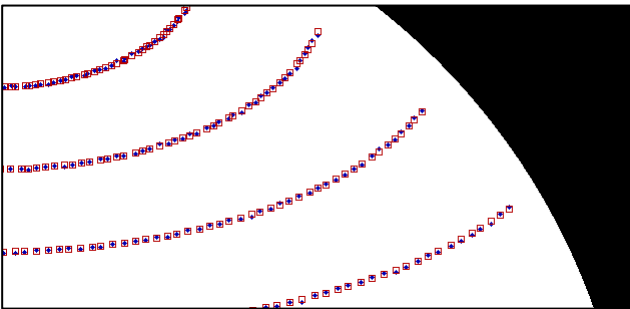
|                           | $\sigma = 0.0$ | $\sigma = 0.5$ | $\sigma = 1.0$ | $\sigma = 2.0$ |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $a_0$                     | 0.00           | 3.80           | 4.70           | 5.65           |
| $a_1$                     | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| $a_3(\times 10^{-4})$     | 0.00           | 1.63           | 3.57           | 1.86           |
| $a_3(\times 10^{-7})$     | 0.00           | 5.58           | 13.7           | 5.56           |
| $a_4(\times 10^{-9})$     | 0.00           | 0.50           | 1.46           | 0.52           |
| $u_0$ [pixel]             | 0.00           | 0.50           | 0.43           | 1.29           |
| $v_0$ [pixel]             | 0.00           | 0.34           | 0.55           | 1.21           |
| $E$ [pixel <sup>2</sup> ] | 0.00           | 368.10         | 444.50         | 9629.94        |



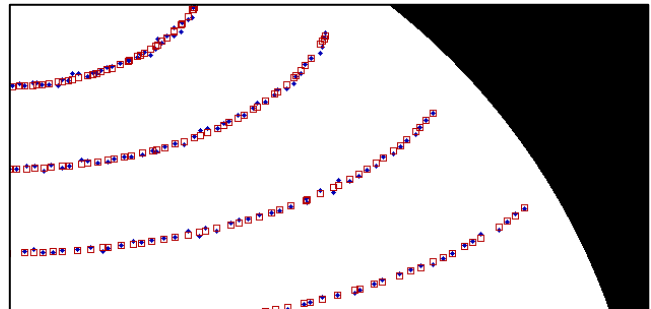
a)  $\sigma = 0.0$  ( $E = 32.70$ [pixel<sup>2</sup>])



b)  $\sigma = 0.5$  ( $E = 310.26$ [pixel<sup>2</sup>])



c)  $\sigma = 1.0$  ( $E = 1283.11$ [pixel<sup>2</sup>])



d)  $\sigma = 2.0$  ( $E = 5463.65$ [pixel<sup>2</sup>])

図 6 各実験の観測点 $\mathbf{p}_{fi}$ と再投影点 $\mathbf{p}_{ri}$ の 1 例

であるので、表 2, 3 より各値を個別にみて推定精度を検証することは難しい。そこで、

1) 上記実験で推定された内部パラメータの  $a_0 \sim a_4$  及び真値の画像中心  $u_0, v_0$

2) すべて真値の内部パラメータ

のそれぞれを用いて実験条件と同様の軌跡を生成し、比較した。具体的には 1) 及び 2) の内部パラメータから得られる投影点間の距離の平均と標準偏差によって評価した。結果を図 7 に示す。横軸が各実験にて誤差として与えた乱数の標準偏差  $\sigma$ 、縦軸が投影誤差の平均、エラーバーはその標準偏差を表している。ただし、 $\sigma = 1.0$ ,  $\sigma = 2.0$  の実験中、各 1 回の試行で極めて大きな投影誤差 ( $\sigma = 1.0$  のとき 2109.22[pixel],  $\sigma = 2.0$  のとき 13.20[pixel]) がみられた。これは推定の失敗とみなし、図 7 の結果からは除外した。図 7 より、 $\sigma = 0.0$  のとき、1 点あたり 0.17[pixel] の投影誤差である。表 2 において評価関数  $E$  が小さい値にも関わらず、投影誤差が大きくなることから、内部パラメータと同時に特徴点の仰角  $\beta$  を計算しているため、真値ではない内部パラメータの局所最適解に収束していると考えられる。 $\sigma = 2.0$  のときでも、平均投影誤差は 1.38[pixel] であった。

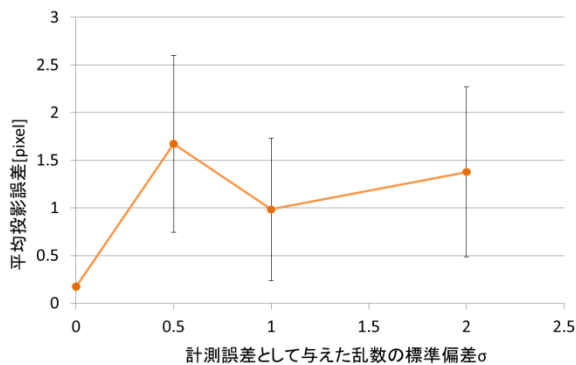


図 7 推定された  $a_0 \sim a_4$  を用いた際の投影誤差

今後、実用化に向けて精度と安定性の向上がさらに必要であり、そのために真値でない内部パラメータの局所最適解に収束することを解決する必要がある。これには、軌跡を取得するときに何らかの手順を加えて拘束条件付きの評価関数に変更する、収束条件を変更することで正しい内部パラメータに収束するようにするなどの解決策が考えられる。

## 5. 結論

カメラを回転させた時に得られる特徴点の軌跡を利用することで、特別なターゲットを用いずに魚眼カメラの内部パラメータを求める手法を提案した。また、シミュレーション実験から、計測誤差が存在しても内部パラメータを推定可能であることを示した。今後は、更なる高精度化や安定化、実機での実験を行う。

## 参考文献

- [1] Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Siegwart, R.: "A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras," Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), pp.5695-5701 (2006)
- [2] Tanaka, Y., Masuyama, G and Umeda, K. : "Intrinsic parameter estimation of a fish-eye camera using trajectories of feature points when rotating the camera," Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), pp.133-134 (2015)