

カメラの回転を利用した魚眼カメラの内部パラメータ推定

○ 菱木暁彦[†], 梅田和昇[‡]

○ Akihiko HISHIGI[†], Kazunori UMEDA[‡]

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

[‡]: 中央大学 理工学部, 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。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。これまでカメラの回転は手動で行うことを想定していたのに対し、本論文では、回転台を用いることを想定し回転角を既知とした場合における評価関数を構築することで内部パラメータ推定の高精度化を目指す。

＜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]。またこれまで、魚眼カメラのモデルと評価関数を変更

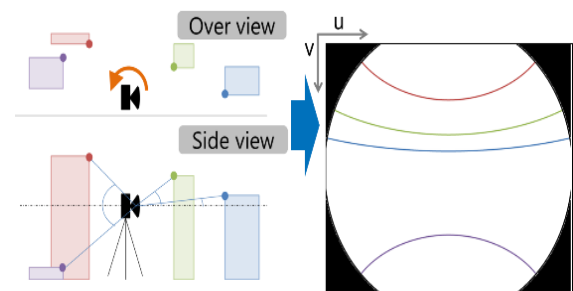


図1 特徴点軌跡の生成

し個々の精度と安定性の検証を行ってきた[3]。これらの提案手法では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。

本論文では、内部パラメータ推定の自動化及び高精度化を図るため回転台を用いることを想定し、回転角を既知とした場合における評価関数を再構築する。またシミュレーションにより有用性を検討する。

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

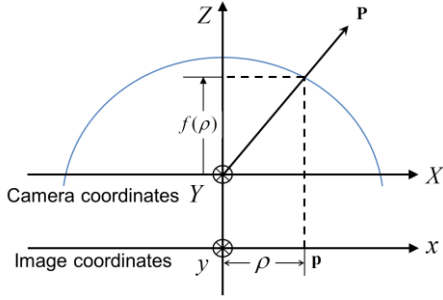


図2 3次元点の射影

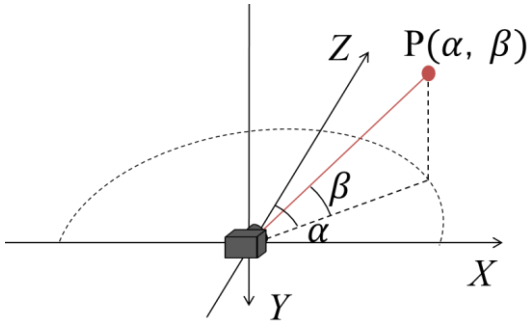


図3 3次元点の定義

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 ρ 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 α と仰角 β 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

従来の評価関数[2][3]は内部パラメータの推定をする際に, 特徴点の仰角も推定する必要があった. 特徴点の仰角の推定精度が内部パラメータの推定値のばらつきや推定の安定性に大きく影響してしまうことが考えられる.

そこで本論文では, 回転角を既知とした拘束を加える. カメラを回転させた時のある場所での観測点を $\mathbf{p}_{fi} = [u_{fi} \ v_{fi}]^T$ とする. 同一の軌跡中で隣り合う観測点の u 座標に注目すると式(4)から

$\mathbf{p}_{fi+1} = [u_{fi+1} \ v_{fi+1}]^T$ の u_{fi+1} 座標は方位角 α を消去したかたちで回転角 $\Delta\alpha$ と $\mathbf{p}_{fi}$ によって以下のように表される.

$$\begin{aligned} u_{i+1} &= -\tan(\alpha + \Delta\alpha) \cdot f(\rho_{i+1}) + u_0 \\ &= \frac{u_i - u_0 - f(\rho_i) \cdot \tan\Delta\alpha}{(u_i - u_0) \cdot \tan\Delta\alpha + f(\rho_i)} \cdot f(\rho_{i+1}) + u_0 \end{aligned} \quad (5)$$

次に再投影点 $\mathbf{p}_{ri} = [u_{ri} \ v_{ri}]^T$ の v 座標 v_{ri} に着目する. ここで $v_{ri} = v_{fi}$ である. ある軌跡中の観測点 $\mathbf{p}_{fi}$ と再投影点 $\mathbf{p}_{ri}$ の u 座標の差の2乗和 D は以下で与えられる.

$$D = \sum_{i=1}^N (u_{fi+1} - u_{ri+1})^2 \quad (6)$$

N は1本の軌跡中の観測点数である. m 番目の軌跡に対する D を D_m とし, 評価関数 E を以下のように定義する.

$$E = \sum_{m=1}^M D_m \quad (7)$$

M は軌跡の本数である. 評価関数 E は観測点 $\mathbf{p}_{fi}$ と内部パラメータ $\mathbf{I}$ 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.

3.2 推定の流れ

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. 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.

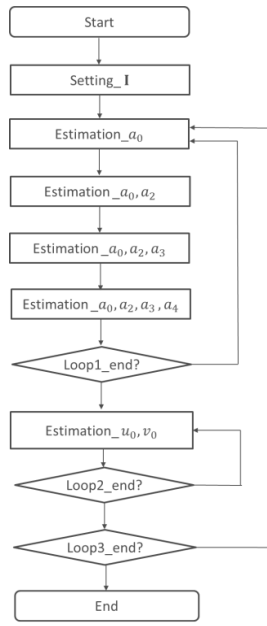


図 4 推定の流れ

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変更しながら反復計算する．推定の終了判定は，ループごとに評価関数の値を比較する．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 に示す．

4. シミュレーション

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 条件

回転台に取り付けられた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 [pixel]，標準偏差 $\sigma = 0, 0.5, 1, 2$ [pixel]の正規分布に従う乱数を加えた．

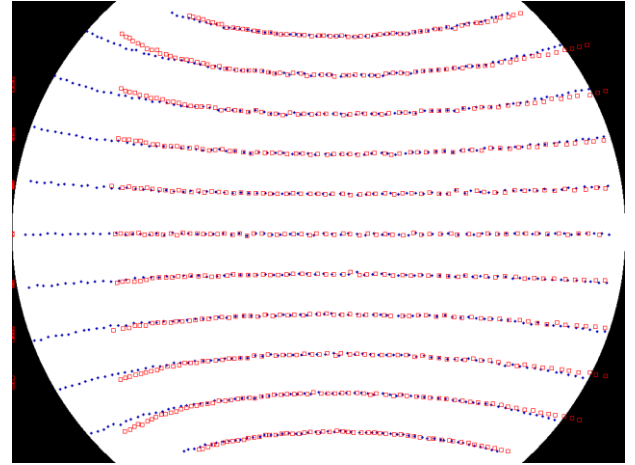


図 5 カメラの回転角が 2° の場合における観測点(青色)と初期値の投影点(赤色)

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

各設定について 10 回試行した．カメラの回転角は 2° に設定した．各画像内の観測点数は 737 点であった． $a_0 \sim a_4$ の初期値を表 1 に示す．またシミュレーションに用いた画像の 1 例と初期値の投影点を図 5 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 シミュレーション結果

各誤差において 10 回の試行で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と標準偏差を表 2 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．青色の点が観測点 $\mathbf{p}_{fi}$ ，赤色の矩形が再投影点 $\mathbf{p}_{ri}$ である．おおよそ正しく推定できていることがわかる．表 2 の画像中心 u_0 ， v_0 に関して， u_0 は推定値の誤差とばらつきが v_0 と比較して非常に大きくなった（平均値の誤差の最大値は， v_0 は 0.75 [pixel]に対し u_0 は 6.04 [pixel]）．

歪を表す係数である $a_0 \sim a_4$ は 1 つの関数の係数であるので，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．

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

	True value	$\sigma = 0$		$\sigma = 0.5$		$\sigma = 1$		$\sigma = 2$	
		Ave.	S.D	Ave.	S.D	Ave.	S.D	Ave.	S.D
a_0	-403.67	-403.63	0.00	-398.04	2.89	-396.71	2.23	-396.31	2.17
a_1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$a_3(\times 10^{-4})$	9.39	9.37	0.00	6.54	1.45	5.93	1.02	5.87	1.00
$a_3(\times 10^{-7})$	-4.42	-4.33	0.00	5.67	5.18	7.52	3.51	7.38	3.52
$a_4(\times 10^{-9})$	1.29	1.28	0.00	0.32	0.50	0.16	0.33	0.17	0.35
$u_0[\text{pixel}]$	547.94	547.92	0.00	545.43	3.30	545.62	8.34	541.90	27.34
$v_0[\text{pixel}]$	387.58	387.58	0.00	387.43	0.39	387.46	0.98	388.33	2.85
$E [\text{pixel}^2]$	---	0.00	0.00	416.99	19.79	1601.53	131.76	6457.50	488.20

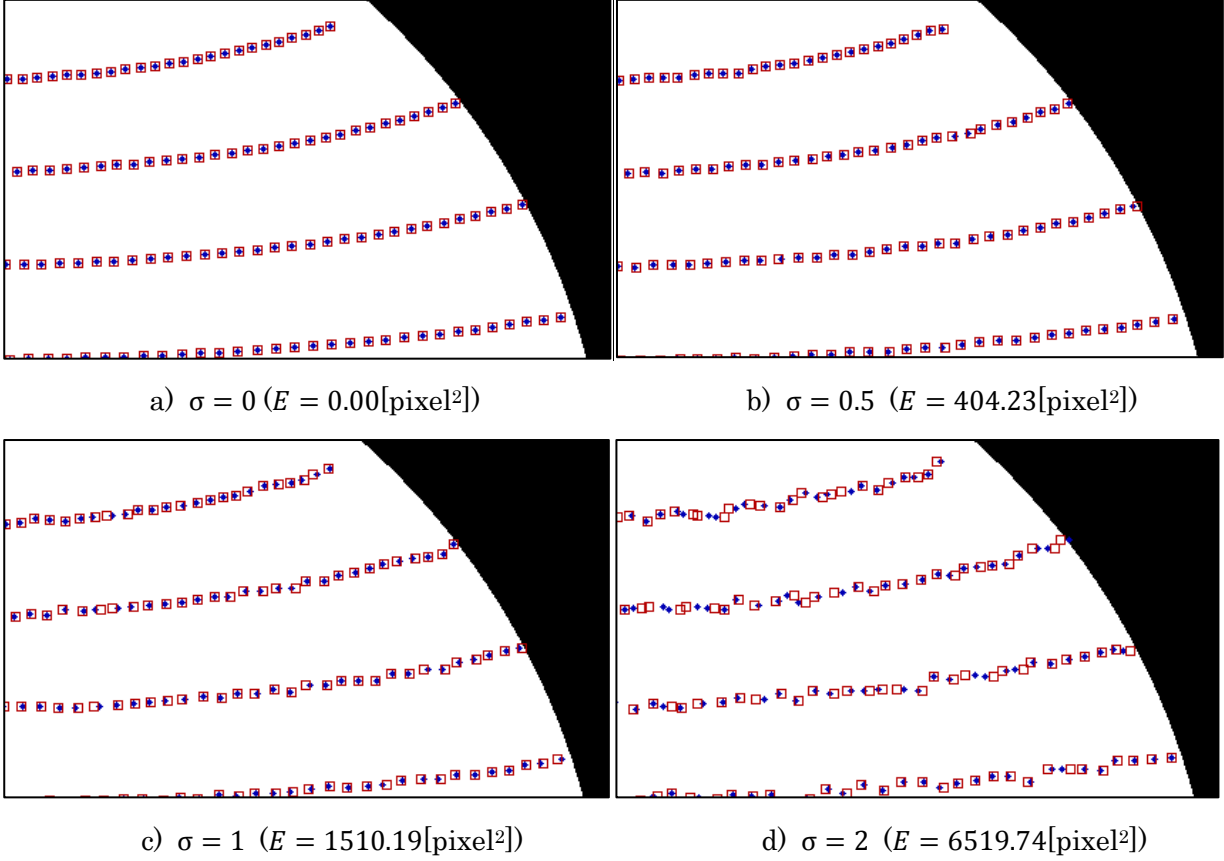


図 6 各計測誤差の観測点 $\mathbf{p}_{fi}$ と再投影点 $\mathbf{p}_{ri}$ の 1 例

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シミュレーションの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 σ 、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。図 7 より、 $\sigma = 2 [\text{pixel}]$ のときでも、1 点あたり $1.21 [\text{pixel}]$ の投影誤差に収まった。

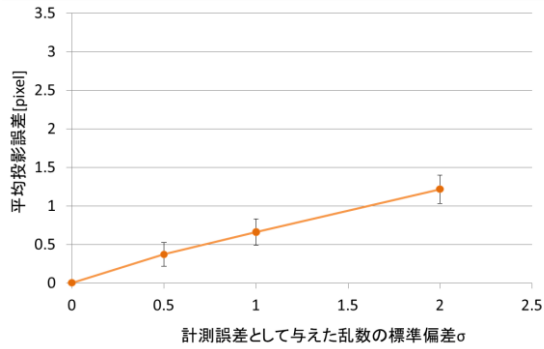


図 7 1 点あたりの再投影誤差

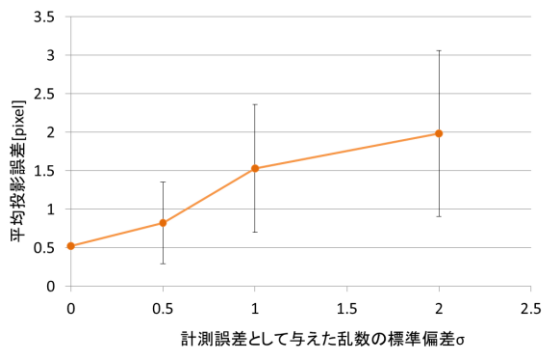


図 8 従来の評価関数を用いた際の再投影誤差

4.3 従来の評価関数との比較

シミュレーションの条件を 4.1 節と同様にして、従来の評価関数を用いた内部パラメータ推定を行った。

図 8 に推定に仰角を用いた従来の評価関数での結果を示す。 $\sigma = 0$ [pixel] のとき評価関数 E の値は 2.91 [pixel²] であり、1 点あたりの再投影誤差は 0.52 [pixel] であった。これは内部パラメータと同時に特徴点の仰角 β 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ためであると考えられる。

推定結果を比較すると、方位角と仰角を用いない提案手法ではよりばらつきが少なく高精度な推定ができていることが確認できた。

5. 結論

カメラを回転させた時の特徴点軌跡を利用する魚眼カメラの内部パラメータ推定手法において、回転台の利用を想定しカメラの回転に拘束を加え新たな評価関数を構築した。またシミュレーションによって、提案手法は、従来手法よりも高精度な推定が可能であることを示した。今後は特徴点の数や分布による精度のばらつきを検証し、実機実験による有用性の検証を行う。

参考文献

- [1] Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Siegwart, R.: “A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras,” Proc. of IROS2006, pp.5695-5701, (2006).
- [2] 田中 祐輝, 増山 岳人, 梅田 和昇, “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-”, 動的画像処理実利用化ワークショップ DIA2016 講演論文集, IS2-A2, 2016.3.
- [3] 菱木 暁彦, 田中 祐輝, 梅田 和昇: “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精度と安定性の検証-”, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.209-210, 2017.9.