

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手法の構築

田中 祐輝† 増山 岳人‡ 梅田 和昇‡

† 中央大学大学院理工学研究科 ‡ 中央大学理工学部

E-mail: y.tanaka@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

Abstract

魚眼カメラの内部パラメータを推定する手法は多く存在するが、多くの場合、特別なターゲットが必要となる。本論文では、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。カメラを水平面上で回転させることで得られる時系列画像中の特徴点を追跡し、得られる軌跡をもとに内部パラメータを推定する。これにより、追跡可能な特徴点が存在する環境であれば、ターゲットを複数回撮影することなく、簡便に内部パラメータを推定することが可能である。提案手法によるシミュレーション実験を行い、本手法の有用性を示す。

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。魚眼カメラは超広角であるため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、広範囲かつ低コストな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や、魚眼カメラを用いた計測を行う場合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手法は多く研究されているが、特別なターゲットを必要とする手法が多く、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 [1]。そこで本論文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回転させた時の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推定を行う手法を提案する。これにより、ターゲットを複数回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となる。本論文では構築したシミュレータにより本手法の有用性と計測誤差による影響を確認する。

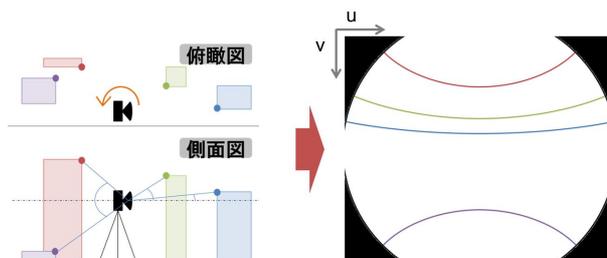


図1 特徴点軌跡画像の生成

2 魚眼カメラによる撮像

魚眼カメラから得られる画像は特有の歪を有し、一般のカメラの射影方式とは異なる。3次元空間中の特徴点が魚眼カメラによってどのように画像に投影されるかを説明する。

2.1 魚眼カメラモデル

魚眼レンズの射影方式は、シーンからレンズへの投射線がレンズの光軸となす角 θ と、画像上の像高 (射影点の光軸からの距離) r [pixel] によって、一般に記述される。魚眼レンズは設計によって射影方式が異なるが、代表的なものは以下の四つである。

$$r = \delta \theta \quad (\text{等距離射影}) \quad (1)$$

$$r = \delta \sin \theta \quad (\text{正射影}) \quad (2)$$

$$r = 2\delta \tan(\theta/2) \quad (\text{立体射影}) \quad (3)$$

$$r = 2\delta \sin(\theta/2) \quad (\text{等立体角射影}) \quad (4)$$

$$\delta = f/w, \quad f: \text{焦点距離 [mm]}, \quad w: \text{画素サイズ [mm]}$$

魚眼レンズの投影は、現実には理想的な射影方式である式 (1)~(4) のいずれにも厳密には従わない。そこで本研究では、中野ら [2] の報告に従い、以下の汎用的な魚眼カメラモデルを用いる。

$$r \approx k_1 \theta + k_3 \theta^3 + k_5 \theta^5 \quad (5)$$

画像中心 c_u, c_v と合わせ、 $\mathbf{I} = [k_1 \ k_3 \ k_5 \ c_u \ c_v]^T$ が内部パラメータである。

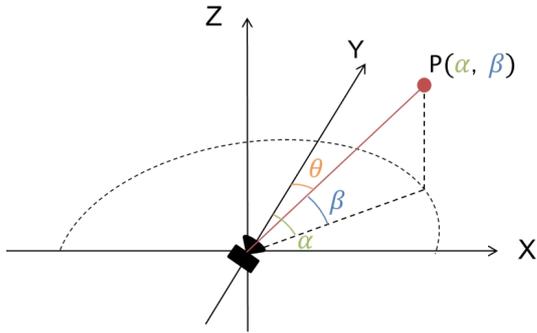


図2 3次元点の定義

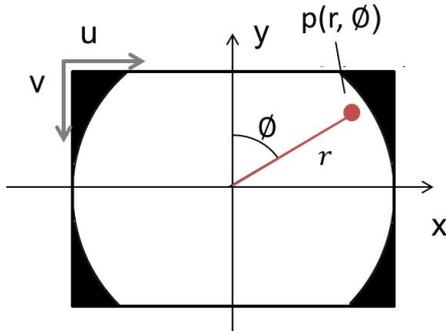


図3 3次元点の魚眼画像への投影

2.2 3次元点の画像への投影

図2に示すように3次元点Pを方位角 α と仰角 β で定義する. このとき, 点Pからカメラへの投射線がカメラの光軸となす角 θ は以下ようになる.

$$\theta = \arccos(\cos \alpha \cdot \cos \beta) \quad (6)$$

また, 投影する画像において, 画像中心と投影点 p を結ぶ線の y 軸との角度 ϕ は以下ようになる.

$$\phi = \arctan\left(\frac{\sin \alpha}{\tan \beta}\right) \quad (7)$$

これを直角座標に変換し, 以下の式によって, 3次元空間中の投影点は画像中に投影される. uv 座標系は画像の左上を原点とする.

$$u = r \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + c_u \quad (8)$$

$$v = -r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + c_v \quad (9)$$

3 内部パラメータ推定手法

提案する内部パラメータの推定手法とその流れを説明する. 本手法の大まかな流れを図4に示す.

3.1 c_u, c_v の推定

図1のように, カメラを水平面上で回転させることで得られる軌跡には対称性がある. このことを利用し,

画像中心 c_u, c_v を推定する. まず, 各軌跡を二次曲線で近似する. 各放物線の頂点の u 座標を計算し, その平均を c_u とする. また, 画像の中心に近づくにつれ放物線の傾きが小さくなることから, 各軌跡の傾きが一番小さい軌跡を選択し, その頂点の v 座標を c_v とする.

3.2 k_1, k_3, k_5 の推定

観測点 m_{f_i} と再投影点 m_{r_i} が一致するように k_1, k_3, k_5 を推定する. まず, 再投影点 m_{r_i} は $\alpha, \beta, \mathbf{I}$ の関数である. そのため, k_1, k_3, k_5 を求めるためには, α, β を与える必要がある. そこで, 初期値として大まかにこの値を求める. 画像中の観測点 m_{f_i} が等距離射影だと仮定し, $v = c_v$ 上の観測点の3次元点の仰角 β を計算する. また, カメラを180度回転させると各軌跡は全長になることから, 軌跡の長さ r と方位角 α は比例すると仮定し, 方位角 α を計算する. その結果を用い, 以下の式(11)~式(12)を計算する.

$$D_{r_j} = \sum_{i=1}^N |m_{f_i} - m_{r_i}| \quad (10)$$

$$D_{s_j} = \sum_{i=1}^N ||m_{f_i} - m_{r_i}| - |m_{f_i} - m_{r_i}|| \quad (11)$$

$$D = \sum_{j=1}^M (D_{r_j} + D_{s_j}) \quad (12)$$

ここで, $i = 1$ は各軌跡の左端に対応し, N は1つの軌跡内の観測点数, M は軌跡の本数である. D_{r_j} は再投影誤差, D_{s_j} は観測された軌跡と再投影された軌跡の形の差を表す値であり, この2つの和を各軌跡の一致度を表す評価関数とする. この評価関数が最小となるように k_1, k_3, k_5 を最適化手法(修正パウエル法を使用)により推定する.

3.3 反復計算

3.2で求めた α, β は大まかな初期値であるため, 図4の各ステップではパラメータの推定後, 投影されている各点の α と β を再計算する. まず, 各軌跡の v 軸に最も近い点に注目する. v 軸上は $\alpha = 0$ であるので, 式(5)を解き, β を得る. 各軌跡の β は同一であるため, 注目点において, 式(6)より, α を得る. 以上より各点の α と β を更新し, 再度パラメータの推定を行う. 以上の流れを繰り返し, 評価値が前回の計算より大きくなるとそのステップの終了とする. 反復計算内のステップでは上記の計算を最低10回は繰り返し, 両ステップとも評価値が前回までの最小の評価値よりも1度も小さくならなければ推定終了とする. また, 全体の流れの中で最小の評価値となったパラメータを推定結果とする.

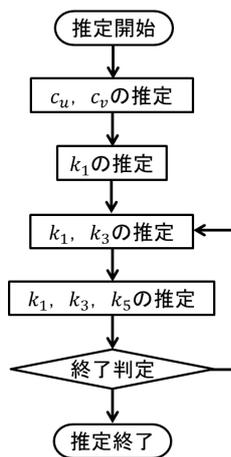


図4 処理の流れ

表1 内部パラメータの真値

| k_1 | k_3 | k_5 | c_u [pixel] | c_v [pixel] |
|--------|-------|-------|---------------|---------------|
| 169.26 | 12.32 | -0.68 | 340.07 | 235.95 |

4 シミュレーション実験

既存のパラメータ推定手法 [3] を用いて求めた実機の内部パラメータを真値として、シミュレーション画像を生成し、そのシミュレーション画像を用い本手法により、内部パラメータの推定を行った。これにより、本手法の有用性を検証する。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確認する。

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180度回転すると仮定し、シミュレーション画像を生成する。シミュレーション画像生成に用いた内部パラメータを表1に示す。特徴点の計測誤差による影響を検証するため、各投影点に u, v 方向にそれぞれ0, 0.5, 1, 2[pixel] の範囲で乱数を発生させ誤差として加えた。各誤差を与えた時のシミュレーション画像を図5~8に示す。白い点群が特徴点軌跡である。画像サイズは668[pixel]×524[pixel]、特徴点数は2377点である。すべての内部パラメータの初期値は0として、推定を行った。

4.2 実験結果

本手法を用い、それぞれの誤差を含んだシミュレーション画像に対して内部パラメータを推定した結果を表2に示す。また、各誤差を与えた時のシミュレーション画像を用いた推定の様子を図9~12に示す。画像全体の右上部分を拡大した図であり、推定の初期と評価関数が最小になった時の画像を上下に表示している。青

表2 推定結果

| | 0[pixel] | 0.5[pixel] | 1[pixel] | 2[pixel] |
|--------------------------------|----------|------------|----------|----------|
| k_1 | 171.34 | 170.70 | 169.7 | 170.64 |
| k_3 | 10.42 | 10.61 | 11.70 | 9.90 |
| k_5 | -0.15 | 0.05 | -0.21 | 0.52 |
| c_u [pixel] | 340.15 | 340.13 | 340.11 | 340.05 |
| c_v [pixel] | 235.95 | 235.94 | 235.93 | 235.91 |
| $\sum_{j=1}^M D_{r_j}$ [pixel] | 1098.68 | 1071.20 | 1561.86 | 3136.09 |
| $\sum_{j=1}^M D_{s_i}$ [pixel] | 755.29 | 725.19 | 1126.18 | 6054.21 |
| D [pixel] | 1854.97 | 1796.39 | 2688.04 | 9190.3 |

色の点が観測点、赤色の点が再投影点である。2つの点が重なった場合は赤色の点として表示している。表2や図9~12から、おおよそ正しく推定が行われていることがわかる。誤差を与えないの時、観測点1点につき0.5[pixel]未滿の再投影誤差となっている。与える誤差が大きくなるにつれて再投影誤差は大きくなる傾向が見られるが、与えた誤差が2[pixel]の時でも観測点1点につき約1.3[pixel]の再投影誤差となった。

5 結論

魚眼カメラを回転させた際の3次元空間中の特徴点軌跡を利用し、魚眼カメラの内部パラメータを推定する手法を提案した。また、提案手法の有用性をシミュレータにより検証し、大よそ正しい値を推定することができた。また、計測誤差を想定した実験により、ある程度の計測誤差が存在しても推定が可能であることを示した。今後は推定手順や収束条件の改良を行うことで、より高精度の推定を目指す。

参考文献

- [1] Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Siegwart, R., "A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), pp.5695-5701, 2006.
- [2] 中野誠士, 李仕剛, 千葉則茂, "球面画像獲得のための魚眼カメラの校正", 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J88-D-II No.9, pp.1847-1856, 2005.
- [3] 奥津良太, 寺林賢司, 梅田和昇, "球体を用いた魚眼カメラの内部パラメータ推定", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J93-D, No.12, pp.2645-2653, Dec. 2010.

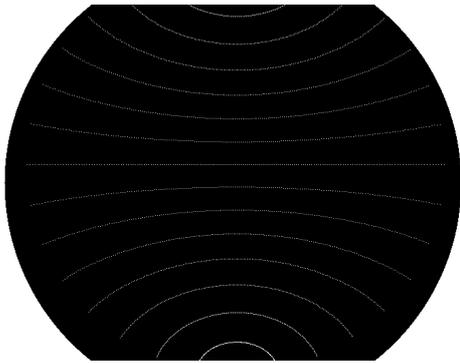


図 5 シミュレーション画像 (誤差 0[pixel])

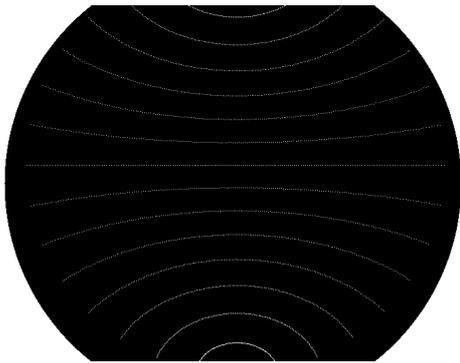


図 6 シミュレーション画像 (誤差 0.5[pixel])

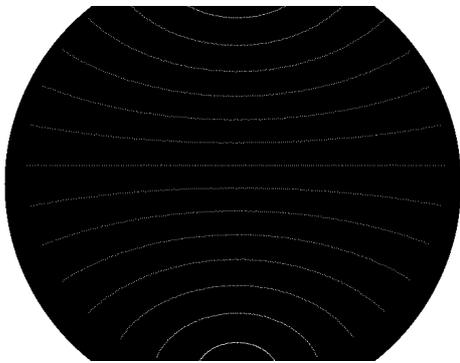


図 7 シミュレーション画像 (誤差 1[pixel])

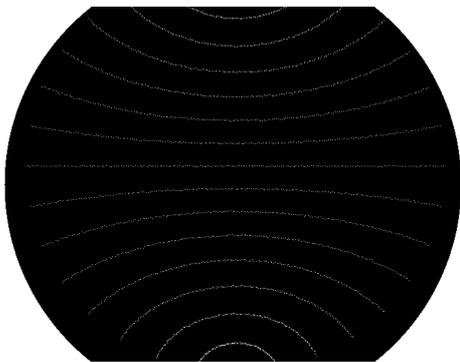


図 8 シミュレーション画像 (誤差 2[pixel])

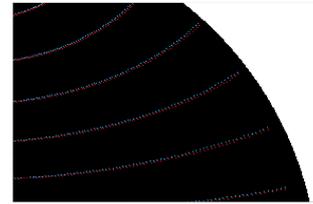
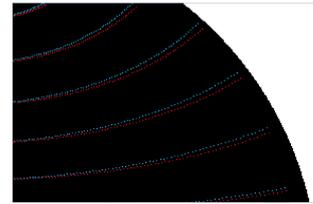


図 9 画像周辺部の収束の様子 (誤差 0[pixel])

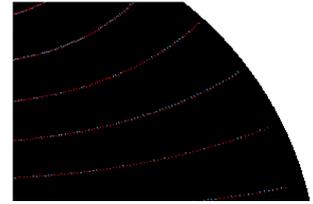
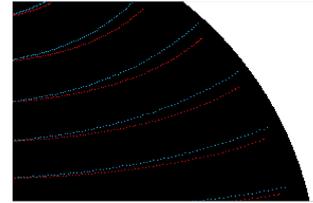


図 10 画像周辺部の収束の様子 (誤差 0.5[pixel])

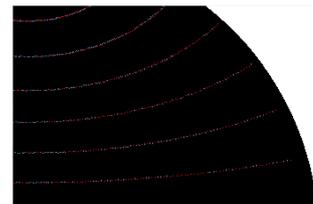
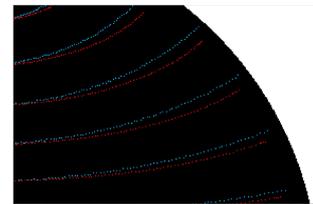


図 11 画像周辺部の収束の様子 (誤差 1[pixel])

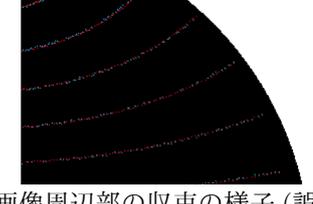
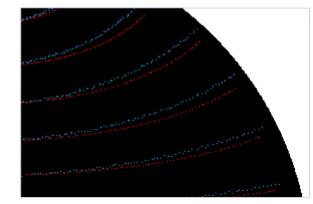


図 12 画像周辺部の収束の様子 (誤差 2[pixel])