

L1 球面投影法による魚眼カメラ内部パラメータのキャリブレーション

駒形 英樹¹ 石井 郁夫¹ 高橋 章² 今井 博英¹ 牧野 秀夫³

新潟大学大学院自然科学研究科¹ 長岡工業高等専門学校² 新潟大学工学部情報工学科³

1 はじめに

広視野角の魚眼カメラは室内のような閉空間内部の3次元計測に適する。計測精度向上には正確な内部パラメータの取得が不可欠である。従来法として、ピンホールカメラモデルに基づいたキャリブレーション法[1]~[4]や座標値の対応関係と魚眼レンズの射影方式のみを用いた方法[5][6]があるが精度が悪い。

本研究では、射影方式と歪みモデルを組み合わせた投影モデルを提案し、座標値の測定を必要としない球面投影によるキャリブレーション法を提案する。また、格子点を使用した歪み補正を行い、従来法との比較を行う。

2 歪みモデルを用いた魚眼レンズの投影モデル

2.1 魚眼レンズの射影方式を用いた投影モデル

魚眼レンズには立体射影方式、等距離射影方式、等立体角射影方式、正射影方式がある。本研究では立体射影方式($r_1 = 2f \tan(\theta/2)$)を使用してキャリブレーションと誤差評価を行う。ここで f はレンズの焦点距離、 r_1 は CCD 撮像面上での光軸中心からの距離、 θ はカメラ座標系でのオブジェクトと光軸のなす角を表す。

カメラ座標系におけるオブジェクト上の点の位置ベクトルを P 、CCD 撮像面上の座標値を (u_1, v_1) 、スクリーン座標値を (u', v') とする。また、スクリーン座標系での光軸中心の座標値を (c_u, c_v) 、CCD1 画素のスケールファクタを (s_u, s_v) とする。 f, s_u, s_v は相互に影響し合うため $k_u = \frac{f}{s_u}$ 、 $k_v = \frac{f}{s_v}$ とおき、4つの内部パラメータ (c_u, c_v, k_u, k_v) を使用する。 $u_2 = fu_1, v_2 = fv_1$ とすると、 (u_2, v_2) は式(1)で表せる。 $r_2 = \sqrt{u_2^2 + v_2^2}$ とし、立体射影方式を θ について解くと式(2)になる。また、 θ を用いて P と (u_2, v_2) の関係を表すと式(3)になる。

$$\begin{cases} u_2 = (u' - c_u)/k_u \\ v_2 = (v' - c_v)/k_v \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta = 2 \arctan(r_2/2) \quad (2)$$

$$P // (u_2, v_2, r_2 / \tan \theta) \quad (3)$$

2.2 歪みを考慮した投影モデル

透視投影レンズには式(4)で表される放射歪み、偏心歪み、Thin Prism 歪みがある事が知られている[7]。このモデルと2.1に示した射影方式によるモデルを使用して魚眼レンズ全体の投影モデルとする。 $r_3 = \sqrt{u_3^2 + v_3^2}$ とすると、式(1)(2)(4)(5)で P と (u', v') の関係を表す。

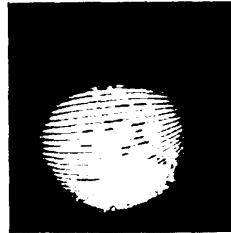


図 1

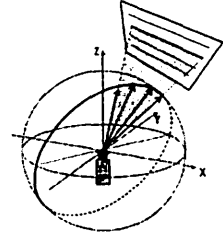


図 2

$$\begin{pmatrix} u_3 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1+g_3 & g_4 & g_1 \\ g_2 & g_3 & g_2+g_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_2^2 \\ u_2 v_2 \\ v_2^2 \end{pmatrix} + (1+k_1 r_2^2) \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$P // (u_3, v_3, r_3 / \tan \theta) \quad (5)$$

3 球面投影法によるキャリブレーション

液晶ディスプレイに表示したパターンを用いてキャリブレーションを行った。液晶ディスプレイの利用はパターンの幾何学的精度が高いこと、画像処理精度向上のためのパターンの変更が容易なことなど、キャリブレーション精度の向上に有効である。表示した等間隔並行直線は、魚眼カメラ画像では図1のような曲線群となる。

投影中心を中心とする仮想球面を考えると、実空間上の全ての直線はこの球面の大円上に投影される。画像への射影が正確であれば画像からの再投影像もこの大円上に投影される。実際には理論値とは一致しないので、キャリブレーションチャートの直線毎に以下の方法で最小二乗法により大円を推定する。

大円と単位投影ベクトル $P_j (P_x, P_y, P_z)$ の二乗距離の総和 e_1 を最小にする大円を求める。最小二乗法に関する連立方程式を解くと、大円の単位法線ベクトル N は式(6)(7)のようになる。 N を用いると、 e_1 は式(8)より得られる。ここで、 n_1 は一直線あたりの標本点数である。

$$\begin{cases} C_1 = \overline{P_x P_x} \overline{P_x P_y} - \overline{P_x^2} \overline{P_x P_z} \\ C_2 = \overline{P_x P_x} \overline{P_x P_y} - \overline{P_x^2} \overline{P_y P_y} \\ C_3 = \overline{P_x^2} \overline{P_y^2} - \overline{P_x P_y}^2 \\ C_4 = \overline{P_x^2} \\ C_5 = \overline{P_x P_y} \\ C_a = (C_1, C_2, C_3) \\ C_b = (C_4, C_5, 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$N = \left\{ \frac{C_a}{|C_a|} \mid |C_a| \neq 0 \right\} \text{ or } \left\{ \frac{C_b}{|C_b|} \mid \begin{matrix} |C_a| = 0 \\ |C_b| \neq 0 \end{matrix} \right\} \quad (7)$$

$$\text{or } \left\{ (1, 0, 0) \mid \begin{matrix} |C_a| = 0 \\ |C_b| = 0 \end{matrix} \right\}$$

表1 キャリブレーション結果

$C_u=511.646$	$k_u=232.905$	$g_3=0.00207078$
$C_v=503.182$	$g_1=0.000983658$	$g_4=0.00191763$
$k_v=233.804$	$g_2=-0.000180312$	$k_1=-0.00989576$

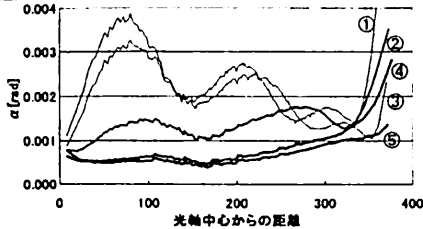


図3 キャリブレーション誤差の平均

$$e_1 = \sum_{j=1}^{n_1} (N \cdot P_j)^2 \quad (8)$$

撮影された n_2 本の直線全てについて、 $e_2 = \sum^{n_2} e_1$ が最小になるようなパラメータを求めることにより、内部パラメータを得る。最適化には Powell の方法、Brent の方法を用いた。

4 キャリブレーション結果と考察

立体射影方式魚眼レンズ (FIT 社 FI-21) と KODAK MEGAPLUS カメラ (ES1.0/MV) を用いて液晶ディスプレイ (SHARP LL-T1610W) に 54 本表示した平行線を 100 枚撮影し、Gaussian スムージングカーネルの偏微分 [8] を用いて座標点を抽出した。2.2 のモデルを使用したキャリブレーション結果を表 1 に示す。

次に、2.2 のモデルのキャリブレーション誤差を 2.1 のモデルと 3 つの従来法 (2 次多項式モデル [1], FOV1 モデル [2], FOV2 モデル [2]) と比較した。

キャリブレーションとは別の平行線画像を 100 枚撮影し、それぞれのモデルのキャリブレーション結果を用いて大円と再投影ベクトル P_j とのなす角 $\alpha = \arccos(N \cdot P_j)$ の平均を光軸中心からの距離毎に計算した。

2 次多項式モデル、FOV1 モデル、FOV2 モデル、2.1 のモデル、2.2 のモデルの平均誤差をそれぞれ図 3 の ①～⑤ に示す。図 3 より、2.2 で示したモデルの誤差が一番小さいことがわかる。

5 歪み補正

画像周辺部に残っているキャリブレーション誤差を減らすために横線と縦線を利用して歪み補正を行う。4 と同様に横線を撮影し、カメラを固定したままディスプレイの表示を切り替え縦線の撮影を行う。4 のキャリブレーション結果を用いて図 4 のように大円と、横線と縦線の画像上の交点の投影ベクトル P_i を求める。大円同士の交線と P_i との誤差 Q_i の方向と大きさの重み付け平均を図 5 のような区画に分けて計算し、区画間の線形補間を行って歪みを補正する。

2.2 のモデルの歪み補正を行い、4 と同様にキャリブレーション誤差を求めた結果を図 6 に示す。画像中心部の誤差はほとんど変化がないが、光軸中心から 300[pix] 以上はなれた部分では歪み補正を行った後の方が誤差が小さくなっている。

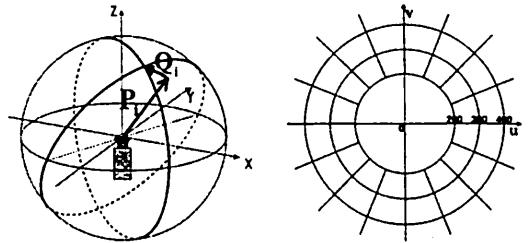


図4 歪み補正モデル

図5 歪み補正区画

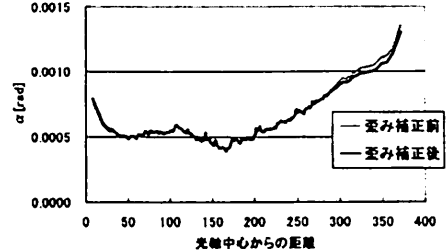


図6 キャリブレーション誤差の平均

6 まとめ

射影方式と歪みモデルを組み合わせた投影モデルと直線を利用した球面投影法による内部パラメータのキャリブレーション法を提案し、従来法と比較して有効性を確かめた。また、格子点を使用した歪み補正を行い、画像周辺部のキャリブレーション誤差を小さくした。

本論文では立体射影方式について実験を行ったが、他の射影方式についてもそれぞれの射影方式を適用すれば同様にキャリブレーションを行うことができる。

画像周辺部に残っているキャリブレーション誤差を減らすことと魚眼レンズを使用した 3 次元計測が今後の課題である。

参考文献

- [1] A.Base, S.Licardie "Alternative models for fish-eye lenses" Pattern Recognition Letters(1995), 16, pp.433-441
- [2] F.Devernay, O.Faugeras "Straight line have to be straight" MVA(2001), 13, pp.14-24
- [3] S.Shah, J.K.Aggarwal "Mobile Robot Navigation And Scene Modeling Using Stereo Fish-Eye Lens System" MVA(1997), 10(4), pp.159-173
- [4] S.S.Beauchemin, R.Bajcsy, G.Givaty "A Unified Procedure for Calibrating Intrinsic Parameters of Fish-Eye Lenses" VI(99), pp.272-279, Canada, May
- [5] 宮川勲, 若林佳織, 有川知彦 "全方位射影型因子分解法による全方位画像からの運動と形状復元" 信学技報 (PRMU2002-37)
- [6] J.Pers, S.Kovacic "Nonparametric, Model-Based Radial Lens Distortion Correction Using Tilted Camera Assumption" Computer Vision Winter Workshop, pp.286-295, Austria, Feb.2002
- [7] J.Weng, P.Cohen, M.Herniou "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation" IEEE Trans Patt Anal Mach Intell 14(10), Oct.1992
- [8] C.Steger "Extraction of Curved Lines from Images" 13th International Conference on Pattern Recognition II, pp.251-255, 1996