

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の高精度化*

菱 木 暁 彦** 梅 田 和 昇***

Improvement on Accuracy of Fisheye Camera's Intrinsic Parameter Estimation Using Camera Rotation

Akihiko HISHIGI and Kazunori UMEDA

This paper improves accuracy of fisheye camera's intrinsic parameter estimation method using camera rotation by adding constraint to the camera rotation. The method takes advantage of trajectories of feature points in the scene. The trajectories of feature points are obtained by a rotation movement of the camera in a specific plane. The method therefore can utilize rich feature points for calibration, and furthermore, specific calibration targets are not required. The effectiveness of the proposed method is evaluated by simulations and experiments using a real fisheye camera. The improvement of the proposed method is verified by converting fisheye images to perspective images using the estimated parameters. Comparison with an existing method is also performed.

Key words: fisheye camera, intrinsic parameter, calibration, optimization, parameter estimation

1. 緒 言

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システム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など、画像処理を用いた計測を行う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。内部パラメータとは画像中心、焦点距離、レンズ歪などカメラ固有の値で、これらの推定精度が画像処理の結果に大きく影響を与える。魚眼カメラの内部パラメータを推定する研究^{1)~6)}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 らの手法では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⁷⁾。Kannala らは一枚のキャリブレーションボードを一回のみ撮影することで魚眼カメラの内部パラメータを推定しているが、そのボードは 2m×3m と大きく、扱いづらい⁸⁾。また、これらの手法は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。我々は、キャリブレーション用のターゲットを用いず、実環境中でカメラを光軸と垂直な軸回りに回転させることで得られる特徴点の軌跡情報から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⁹⁾¹⁰⁾。図 1 に本手法の概念図を

示す。図 1 は、カメラを回転させながら画像を取得し、特徴点の抽出、追跡を行うことで特徴点の軌跡画像を生成する様子を示している。これまでは、内部パラメータを推定する際に特徴点の仰角・方位角も同時に推定する必要があったが、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、精度や安定性が低下することがわかっている¹¹⁾。カメラを回転させる際に、回転角を制御できる回転台などを用いることで回転角を制御することは容易である。そこで本論文では、内部パラメータ推定の高精度化を図るため、回転角を既知とした拘束を加えることによって、特徴点の 3 次元位置を必要としない評価関数を再構築する¹²⁾。またシミュレーションと実機実験により有用性を検討する。

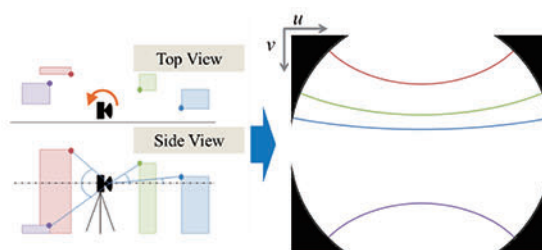


Fig.1 Trajectories of feature points using camera rotation

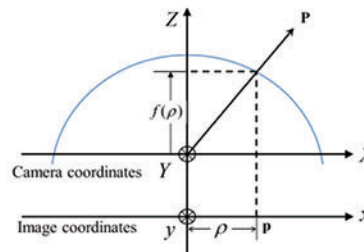


Fig.2 Camera model

* 原稿受付 平成 30 年 5 月 6 日

掲載決定 平成 30 年 9 月 5 日

** 学生会員 中央大学大学院 (現、成田空港給油施設(株); 千葉県成田市三里塚字御料牧場 1-2 臨空開発第一センタービル)

*** 正 会 員 中央大学 (東京都文京区春日 1-13-27)

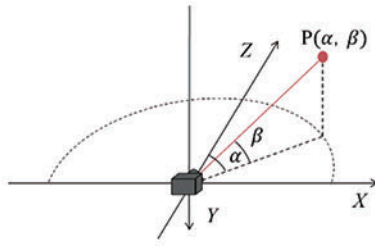


Fig.3 Elevation and azimuth angles of 3D point

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⁹⁾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 $\mathbf{P}$ の方向を方位角 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. 内部パラメータの推定手法

3.1 評価関数の最小化による推定

従来の評価関数^{9) 10)}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)から方位角 α を消去することで、 $\mathbf{p}_{fi+1} = [u_{fi+1} \ v_{fi+1}]^T$ の u 座標 u_{fi+1} は回転角 $\Delta\alpha$ と $\mathbf{p}_{fi}$ によって以下のように表される。

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

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。

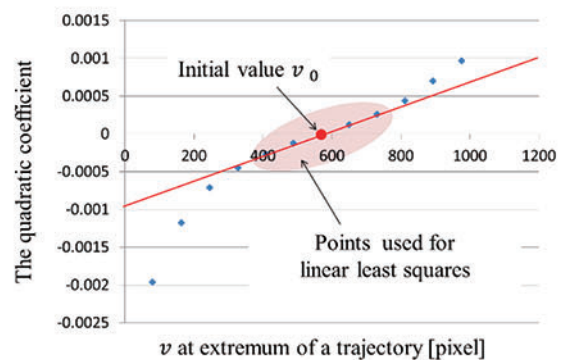
$$E = \sum_{m=1}^M D_m \quad (7)$$

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。そこで、評価関数 E を最小とする内部パラメータ $\mathbf{I}$ を最適化手法により求める。

3.2 推定の流れ

最初に内部パラメータ $\mathbf{I}$ の初期値を設定する。内部パラメータ $\mathbf{I}$ のうち、 $a_0 \sim a_4$ は手動で値を設定する。ここでは100から0までの値を与えた。 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。 v_0 に関しては図4に示すように、2次の係数と頂点の v 座標をプロットし、線形近似する。2次の係数が0となる v を求め、その値を v_0 とする。

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。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を図5に示す。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。図5のループに関して、Loop1では $a_0 \sim a_4$ 、Loop2では u_0 と v_0 の推定をそれぞれ行う。Loop3では推定された評価関数の値が前回の値より大きくなった場合に推定終了とする。


Fig.4 Calculation of v_0

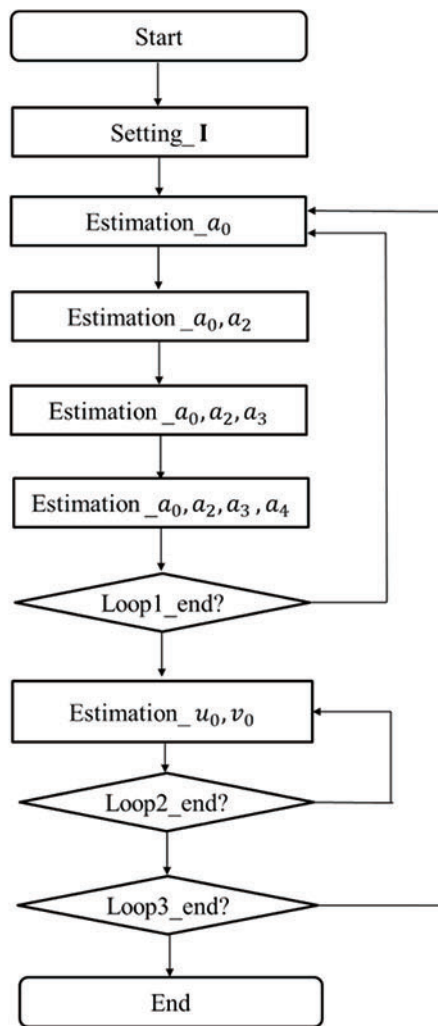


Fig.5 Flow of estimation intrinsic parameters

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、本論文の提案手法の有用性を検証した。画像は既存のパラメータ推定手法⁷⁾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, 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。

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。 $a_0 \sim a_4$ の初期値は、 a_0 は100, それ以外は全て0とした。初期値の投影点を図6に示

す。青色の点が観測点 $\mathbf{p}_{fi}$, 赤色の矩形が再投影点 $\mathbf{p}_{ri}$ を示している。 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(上下各2本)とした。最適化には修正パウエル法¹³⁾を用いた。

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1に示す。表1には $a_0 \sim a_4$ の真値も示されている。初期値として与えた値がこれらとは大きく異なっているにも関わらず内部パラメータを求めることが出来ており、提案手法の収束性の良さが示されている。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7に示す。図7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1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。例えば、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である。

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1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 $a_0 \sim a_4$ および画像中心 u_0 , v_0 の真値

2) すべての内部パラメータの真値

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8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8より、 $\sigma = 2$ pixelのときでも、1点あたり1.21 pixelの投影誤差に収まった。

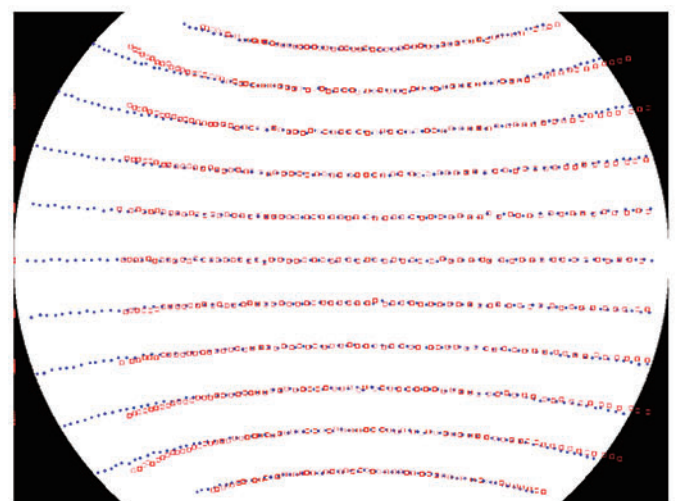


Fig.6 Simulation image and initial reprojected point

Table 1 True value and estimation results I

	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 pixel	547.94	547.92	0.00	545.43	3.30	545.62	8.34	541.90	27.34
v_0 pixel	387.58	387.58	0.00	387.43	0.39	387.46	0.98	388.33	2.85
E pixel ²	---	0.00	0.00	416.99	19.79	1601.53	131.76	6457.50	488.20

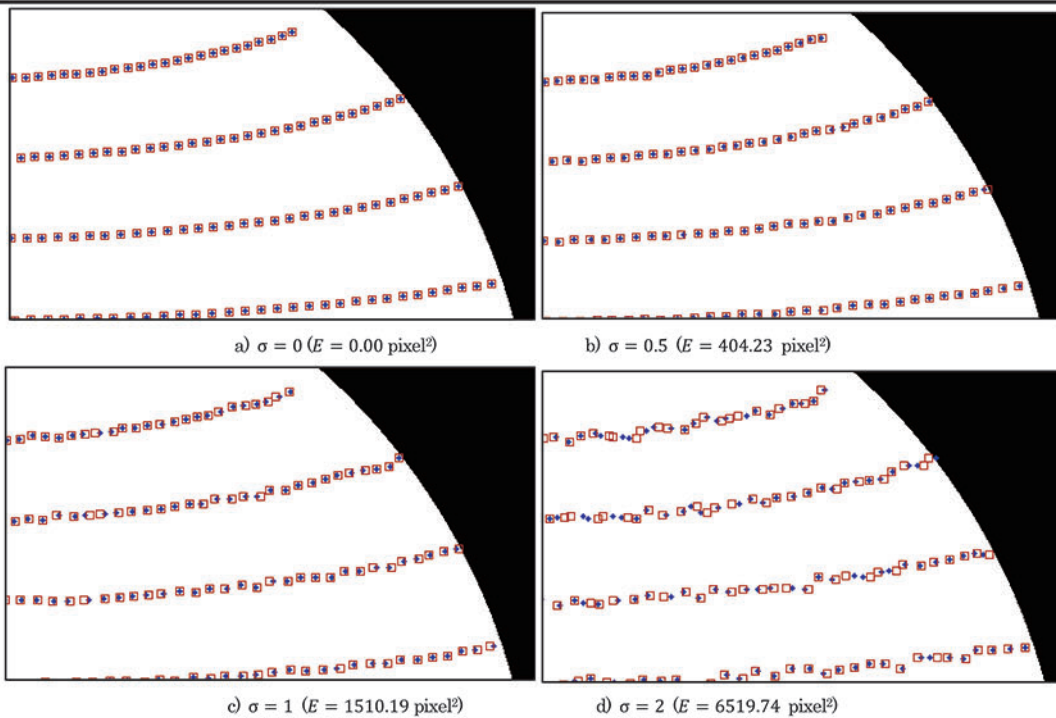
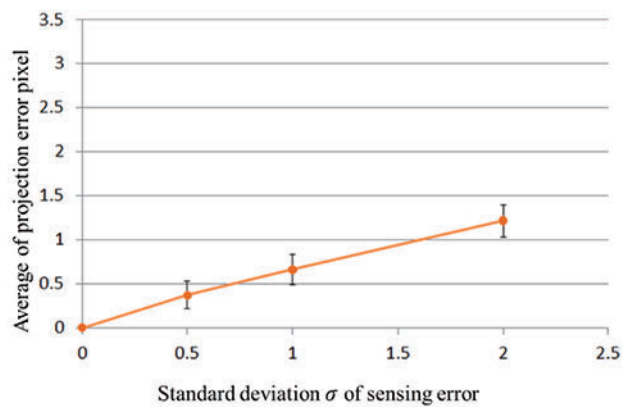
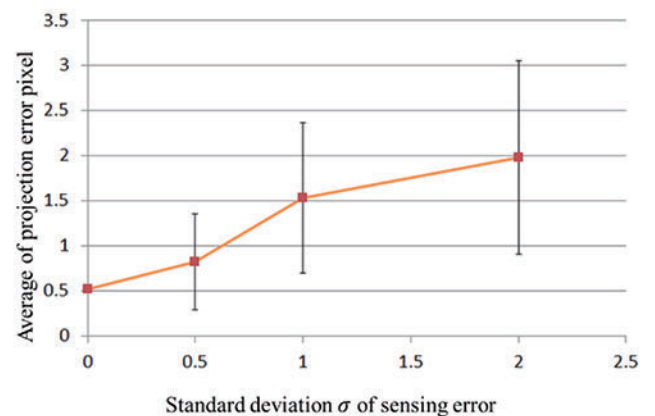

Fig.7 Results of reprojected points $\mathbf{p}_{ri}$

Fig.8 Reprojection errors using estimated $a_0 \sim a_4$


Fig.9 Reprojection errors using previous method

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⁹⁾¹⁰⁾を用いた内部パラメータ推定を行った。

図9に推定に仰角を用いた従来の評価関数での結果を示す。計測誤差を加えていない $\sigma = 0$ pixelのときに、評価関数 E の値は2.91 pixel²、1点あたりの再投影誤差は0.52 pixelであった。これらの値が0になっていないのは、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. 実験

本手法と従来手法⁹⁾¹⁰⁾を用いて実際の魚眼カメラの内部パラメータ推定実験を行った。また、推定された結果を用いて魚眼画像の透視投影変換を行い、MATLABに実装されているOCamCalib⁷⁾を用いて推定した場合とで比較した。また、透視投影変換した画像から定量的評価による比較を行った。

5.1 実験条件

4.1節で述べたカメラの回転の条件で、図10(a)に示すように、回転台の上に取り付けられた魚眼カメラを回転させた。回転台としては、電動カメラ雲台 KONOVA smart pan-tilt head M1を使用した。回転角はコントローラの設定によって制御されており、画像の取得は一定の間隔で行われる。カメラから得られた画像の一例を図10(b)に示す。取得された各画像で特徴点を抽出した。図11のように連続した画像間で抽出した特徴点をマッチングさせ、軌跡を取得した。特徴点の取得とマッチングにはAKAZE¹⁴⁾を用いた。シミュレーションの時と同じ初期値を用い、 v_0 の初期値計算に使用する軌跡を画像中心に近い4本(上下各2本)とした。実験の回転角は4°に設定した。また推定を安定的に行うために、得られた軌跡の中から特徴点軌跡が明らかに誤対応点を含むものは手で除外した。

5.2 実験結果

推定終了時の観測点 p_{fi} と再投影点 p_{ri} を図12に示す。点が観測点 p_{fi} 、矩形が再投影点 p_{ri} を示している。図12から、実験によって得られた軌跡においても評価関数の最小化は概ね正しく行われていることがわかる。本手法と従来手法によって推定した内部パラメータ I を用いて透視投影変換を行った結果をそれぞれ図13(a)、図13(b)に示す。また、既存手法であるOCamCalibを用いて推定した場合を図13(c)に示す。画像の歪が除去され、直線的な画像になっていることが確認できる。画像左上の部分については、提案手法の方が従来手法よりも歪が除去できており、OCamCalib手法と同程度であることがわかる。

5.3 定量的評価

実験では、内部パラメータの真の値は未知である。そこで定量的評価として、提案手法と従来手法、OCamCalib手法で計算された $f(\rho)$ を比較する。結果を図14に示す。提案手法は従来手法と同程度であり、OCamCalib手法と比較すると画像の中心部で多少のずれはあるものの概ね一致しており、推定された内部パラメータがおおよそ正しい値であると言える。次に、透視投影変換された図13のチェッカーボードの格子点の座標を抽出し、最小二乗法による直線あてはめを行った。得られた直線から各点の残差二乗和の総和を比較した。直線あてはめ

はチェッカーボード内の13本の直線を用いた。その結果、提案手法では3.55 pixel²、従来手法では3.38 pixel²、OCamCalibを用いて推定した内部パラメータの場合は1.96 pixel²であり、提案手法は画像中心付近に関して従来手法と比較して同程度であり、OCamCalib手法と比較するとやや誤差が大きくなっているが、十分小さいと考えられる。精度が低下する要因として、カメラの設置位置の誤差があげられる。本手法では、隣り合った特徴点の情報を利用するため、4.1節で示した前提条件に関して、回転軸と光学中心がずれている場合、既知の回転角を用いて推定する再投影点に並進成分のずれが加わるためである。また、推定に用いる軌跡の分布に偏りがあり、正しい内部パラメータを得ることができなかったことも考えられる。今後は特徴点の数や分布による精度のばらつきを検証する必要がある。



(a) Fisheye camera mounted on a rotation table



(b) An example of input image

Fig.10 Camera setting and an example of input image

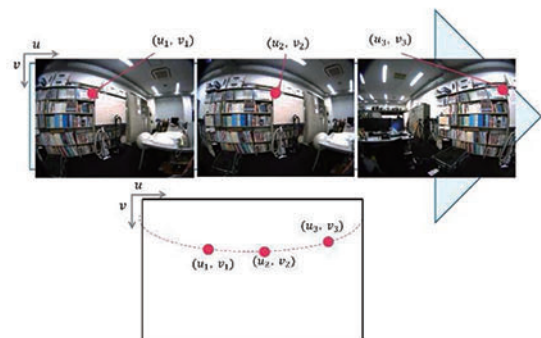


Fig.11 Capturing feature point trajectories

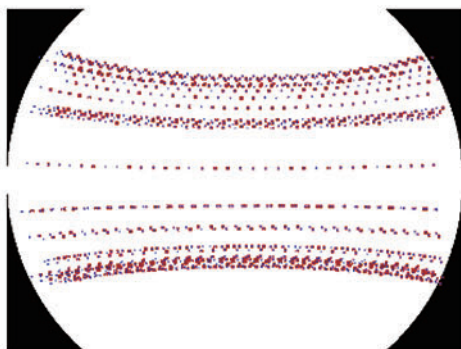
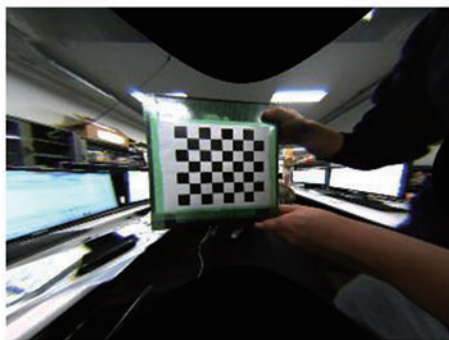
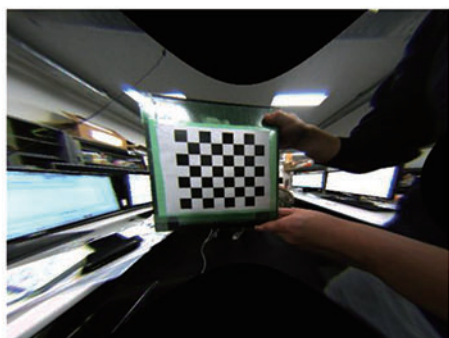


Fig.12 The experiment using real fisheye camera



(a) Proposed method



(b) Previous method



(c) OCamCalib method⁷⁾

Fig.13 Conversion to perspective projection image

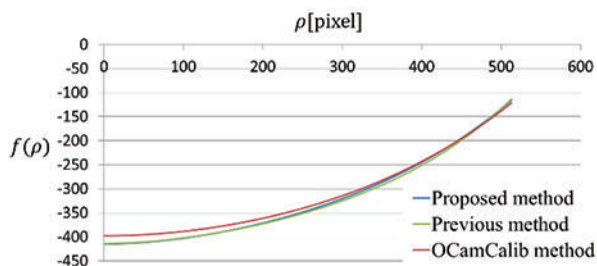


Fig.14 Comparison of estimated $f(\rho)$

6. 結 言

本論文では、カメラを回転させた時の特徴点軌跡の形状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、回転角を既知とした場合の評価関数を再構築した。また、シミュレーションにより計測誤差の影響を確認し、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。また、実機実験により実際のカメラを用いてもおおまかに評価関数の最小化は正しく行われていることを示し、推定されたパラメータを用いた透視投影変換では歪を除去した画像を生成できることを示した。生成された画像の左上では提案手法の方が従来手法に比べて歪が除去できていることを確認した。また、定量的評価により OCamCalib 手法との精度の比較を画像中心部で行い、提案手法は OCamCalib 手法と比較して同程度に推定が可能であることを示した。今後は、本論文で挙げた課題を解決し、より高精度かつ安定的な推定を目指す。

参 考 文 献

- 1) Z. Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**, 11, (2000) 1330.
- 2) P. Carr, Y. Sheikh, and I. Matthews: Point-less Calibration: Camera Parameters from Gradient-based Alignment to Edge Images, Proc. of WACV, (2012)377.
- 3) C. Hughes, P. Denny, M. Glavin, and E. Jones: Equidistant Fisheye Calibration and Rectification by Vanishing Extraction, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **32**, 12, (2010) 2289.
- 4) H. Bakstein and T. Pajdla: Panoramic Mosaicing with a 180° Field of View Lens, Proc. of OMNIVIS, (2002) 60.
- 5) L. Heng, B. Li, and M. Pollefeys: CamOdoCal: Automatic Intrinsic and Extrinsic Calibration of a Rig with Multiple Generic Cameras and Odometry, Proc. of IROS, (2013) 1793.
- 6) M. Rufli, D. Scaramuzza, and R. Siegwart: Automatic Detection of Checkerboards on Blurred and Distorted Images, Proc. of IROS, (2008) 3121.
- 7) D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart: A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras, Proc. of IROS, (2006) 5695.
- 8) J. Kannala, S. S. Brandt: A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional, Wide-angle, and Fish-eye Lenses, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **28**, 8, (2006) 1335.
- 9) A. Hishigi, Y. Tanaka, G. Masuyama, and K. Umeda: Fisheye Camera's Intrinsic Parameter Estimation Using Trajectories of Feature Points Obtained from Camera Rotation, Proc. of SII, (2017) 529.
- 10) 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, (2016).
- 11) 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-, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2017) 209.
- 12) 菱木暁彦, 梅田和昇: 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, 動的画像処理実利用化ワークショップ DIA2018 講演論文集, (2018).
- 13) M. J. D. Powell, "An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives," Computer Journal, **7**, 2, (1964) 155.
- 14) F. P. Alcantarilla, J. Nuevo, and A. Bartoli: Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces, British Machine Vision Conference, (2013).