

魚眼縦ステレオカメラの平行化

○筑後 光（中央大学）, Sarthak Pathak（中央大学）, 梅田 和昇（中央大学）

Rectification of Fisheye Vertical Stereo Camera

○ Hikaru CHIKUGO (Chuo University), Sarthak PATHAK (Chuo University),

and Kazunori UMEDA (Chuo University)

Abstract: In this study, we propose a rectification method for fisheye vertical stereo camera considering three kinds of errors. For rectification, a rotation matrix and a translation vector are needed. Conventional methods use a direct method to obtain them. However, these values may not be optimal. Therefore, rectification is performed by iteratively obtaining the rotation matrix and the translation vector, considering the three kinds of errors.

1. 緒言

近年、自動運転に関する技術の進歩は目覚ましい。これらのシステムでは、障害物検知などを行うために周囲の状況の把握が必要であり、主に距離情報が用いられる。距離情報を取得するための代表的なセンサとして、ステレオカメラや LiDAR などのレーザセンサ、ソナーなどがある。しかし、従来のセンサでは計測範囲の狭さや計測密度の低さなどのデメリットがある。そこで本研究では、魚眼ステレオカメラに注目した。魚眼カメラは視野角が約 180° と非常に広角であるため、1 台で広範囲な距離画像計測が可能となる。魚眼ステレオカメラを用いた 3 次元計測手法として、Hane らは PlaneSweep 法を用いてリアルタイム 3 次元計測を実現した¹⁾。Moreau らは、等立体角投影モデルの魚眼ステレオカメラを用いて 3 次元環境復元を行う手法を提案した²⁾。Abraham らは、魚眼ステレオカメラにステレオ平行化を適用することで、ステレオマッチングを単純化した³⁾。これらの研究では、対応点探索を簡単に行うため、魚眼画像から透視投影画像への変換を行っている。しかし、変換を行う際に画像周辺部で引き伸ばしが発生するため、画像周辺部でのステレオマッチングが困難となる。

これに対し、大橋らは魚眼画像から正距円筒画像へ変換することで魚眼画像の歪みを低減した 3 次元計測を実現した⁴⁾。しかし、エピポーラ線が湾曲していることによる誤マッチングなどから距離計測精度が不十分である。一方、飯田らは、ステレオ計測と Structure from Motion(SfM) を融合する手法として擬似バイラテラルフィルタを提案した⁵⁾。時系列画像を導入することで距離計測精度が大幅に向上したが、処理速度などに課題を残している。さらに大橋らや飯田らの手法では、ステレオ計測においてカメラを左右に配置することによる基線長の方向により、左右領域の計測精度が不十分である。そこで、新井らは魚眼カメラを縦に配置した魚眼縦ステレオカメラを構築した⁶⁾。魚眼カメラを縦に配置することで、エピポーラ線が直線になることによる誤マッチングの低減を行った。また、基線長の方向により、自動運転などで重要になる左右領域の距離計測精度を向上させた。しかし、CG のような理想環境と比較して実環境では、距離精度が不十分である。理想環境では内部パラメータや外部パラメータを考慮する必要はないが、実環境ではこれらの誤差によ

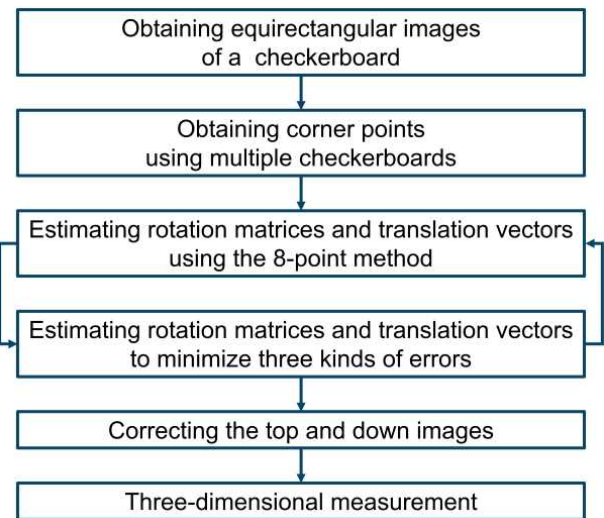


Fig. 1 The flow of proposed method

る誤計測が起こる可能性がある。大橋らや新井らの手法では、外部パラメータである回転行列と並進ベクトルを 8 点法により求めている⁷⁾。しかし、8 点法は直接的な方法であるため、得られた外部パラメータが適切ではない可能性がある。また、Scaramuzza らはチェッカーボードを用いた内部パラメータと外部パラメータを推定する手法を提案した⁸⁾。この手法では、再投影誤差と平面性誤差が最小になるような内部パラメータと外部パラメータを求めている。しかし、この手法で得られる外部パラメータはチェッカーボード 1 枚に対する外部パラメータであるため、チェッカーボードの姿勢によって最適ではない可能性がある。そこで本研究では、複数枚のチェッカーボードを用いて再投影誤差と平面性誤差、直線性誤差の 3 種類の誤差を考慮した反復的な方法で外部パラメータを推定することでより精度良く距離画像計測を行うことを目指す。

2. 提案手法

2.1 概要

提案手法の概要を Fig.1 に示す。まず、魚眼縦ステレオカメラを用いてチェッカーボードを撮影する。次に、魚眼画像の歪みを低減した正距円筒画像への変換を行う。その次に、チェッカーボードから得られたコーナー点からランダムに 8 点取得し、8 点法より外部パラメータである回転行列と並進ベクトルを推



Fig. 2 Conversion to equirectangular images

定する。そして、3種類の誤差を最小にするような回転行列と並進ベクトルを非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法より推定する⁹⁾。ここで、初期値は8点法により得られた回転行列と並進ベクトルとする。8点法による処理と Levenberg-Marquardt 法による処理を複数回繰り返し、3種類の誤差を最小にした回転行列と並進ベクトルを推定する。最後に、最終的に得られた回転行列と並進ベクトルを用いて上下画像の補正を行い、3次元計測を行う⁶⁾。

2.2 正距円筒画像の取得

魚眼画像には、特有の歪みがあるため、Fig.2に示すように魚眼画像から正距円筒画像への変換を内部パラメータを考慮して行う⁴⁾。Fig.2より、歪みが低減されていることが分かる。内部パラメータの推定には、Scaramuzza らの提案した OcamCalibToolbox を用いる⁸⁾。

2.3 8点法による外部パラメータの推定

複数枚のチェッカーボードを撮影した正距円筒画像において、チェッカーボードのコーナー点を取得する。そして、得られたコーナー点からランダムに8点取得し、8点法により回転行列と並進ベクトルを推定する。ここで8点法を行う際、コーナー点は円筒座標から球面座標への変換を行い、正規化座標への変換を行う。

2.4 誤差を考慮した外部パラメータの推定

再投影誤差と平面性誤差、直線性誤差の3種類の誤差を含んだコスト関数

$$E(R, t) = w_1 E_{\text{reproject}}(R, t) + w_2 E_{\text{plane}}(R, t) + w_3 E_{\text{line}}(R, t) \quad (1)$$

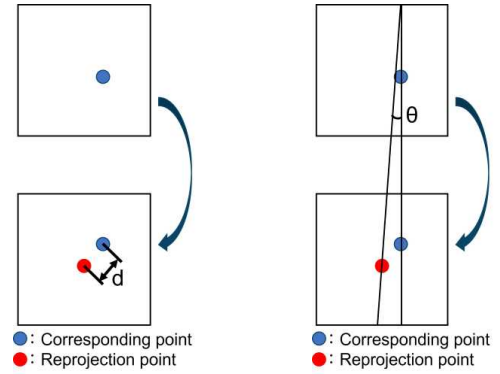
を最小にするような回転行列と並進ベクトルを非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法により推定する。ここで、 $E_{\text{reproject}}(R, t)$ は再投影誤差を表し、 $E_{\text{plane}}(R, t)$ は平面性誤差、 $E_{\text{line}}(R, t)$ は直線性誤差、 w_1, w_2, w_3 は重み、 R は回転行列、 t は並進ベクトルを表している。また、初期値は8点法で得られた回転行列と並進ベクトルとする。さらに、それぞれの誤差はスケールが異なるため、重みを用いている。

2.4.1 再投影誤差

Fig.3(a)に示すように、本研究で用いる再投影誤差は上カメラで得られた正距円筒画像を下カメラへと再投影を行い、下カメラで得られた対応するコーナー点と再投影された点のユークリッド距離とする。ここで、再投影誤差のコスト関数 $E_{\text{reproject}}(R, t)$ は

$$E_{\text{reproject}}(R, t) = \sum_{i=1}^N (p_i - P(RX_i + t)) \quad (2)$$

のように記述出来る。ここで、 p_i は下カメラで得られた対応するコーナー点、 $P(RX_i + t)$ は上カメラで得ら



(a) Reprojection errors

(b) Angle errors

Fig. 3 Examples of errors

れたコーナー点を下カメラへ投影した点を表している。また、 X_i は上カメラで得られたコーナー点の3次元座標、 P は球面座標から正距円筒画像への変換を行う係数を表している。

上カメラで得られた点を下カメラへ再投影を行う式を下記に示す。まず、正距円筒画像上の任意点 (u, v) を球面座標へと変換を行う。方位角を λ 、仰角を ϕ とすると

$$\lambda = \frac{\pi}{M} \left(u - \frac{M}{2} \right) \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\pi}{M} \left(v - \frac{N}{2} \right) \quad (4)$$

のように記述出来る。ここで、 M と N は正距円筒画像の画素数を表している。そして、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \lambda \\ \sin \phi \\ \cos \phi \cos \lambda \end{pmatrix} \quad (5)$$

のような式を用いることで球面座標への変換を行い、この式へ距離を掛けることで3次元座標へと変換することが出来る。この3次元座標を X 、再投影した3次元座標を X_r とすると

$$X_r = RX + t \quad (6)$$

のようにして再投影を行う。再投影された3次元座標 (X_r, Y_r, Z_r) を正規化し、球面座標 (x_r, y_r, z_r) への変換を

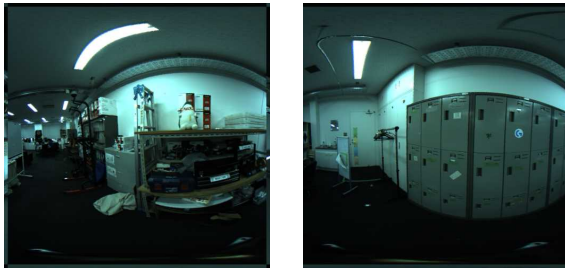
$$[x_r, y_r, z_r]^T = \frac{[X_r, Y_r, Z_r]^T}{\sqrt{X_r^2 + Y_r^2 + Z_r^2}} \quad (7)$$

を用いて行う。この球面座標を正距円筒画像上の点へと上記の式を用いて行う。

2.4.2 平面性誤差

本研究で用いる平面性誤差はコーナー点から最小二乗法により推定された平面とそれぞれのコーナー点までの距離とする。平面を推定する際、撮影されたチェッカーボード1枚ずつのコーナー点を用いて平面を推定する。ここで、コスト関数 $E_{\text{plane}}(R, t)$ は

$$E_{\text{plane}}(R, t) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{|ap_x + bp_y + cp_z + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) \quad (8)$$



(a) Reprojection (b) 3D measurement

Fig. 4 Environment condition

Table 1 Three kinds of errors

	Reprojection [pixel]	Planarity [m]	Linearity [rad]
Proposed	8.80	0.009	0.06
Reprojection only	41.2	0.008	1.76
Planarity only	437	0.011	0.07
Linearity only	436	0.011	0.07
Conventional	439	0.012	0.11

のように記述出来る．ここで， a, b, c, d は平面パラメータ， p_x, p_y, p_z は補正行列により補正されたコーナー点の3次元座標を表している⁶⁾．

2.4.3 直線性誤差

Fig.3(b) に示すように本研究で用いる直線性誤差は上下の正距円筒画像の対応するコーナー点との角度とする．魚眼縦ステレオカメラにおいて，対応するエピポーラ線は理想的には直線になっている．しかし，外部パラメータの誤差により対応するエピポーラ線が直線にならない可能性がある．そこで，対応するコーナー点のベクトルと垂直線分の単位ベクトルとの角度を直線性誤差として用いる．ここで，直線性誤差のコスト関数 $E_{\text{line}}(\mathbf{R}, \mathbf{t})$ は

$$E_{\text{linearity}}(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \left(\arccos \left(\frac{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{e}_y}{\|\mathbf{v}_i\|} \right) \right) \quad (9)$$

のように記述出来る．ここで， $\mathbf{v}_i$ は垂直成分の単位ベクトル， $\mathbf{e}_y$ は対応するコーナー点のベクトルを表している．

2.5 画像の補正と3次元計測

最終的に得られた回転行列と並進ベクトルを用いて画像の補正を行う⁶⁾．正距円筒画像を球面座標へと変換し，補正行列を掛けることで平行化を行う．そして，補正された上下画像より

$$D = b \frac{\cos \varphi_d}{\sin \Delta \varphi} \quad (10)$$

を用いて3次元計測を行う．ここで， φ_d は下カメラでの仰角， $\Delta \varphi$ は視差角を表している．

3. 精度評価実験

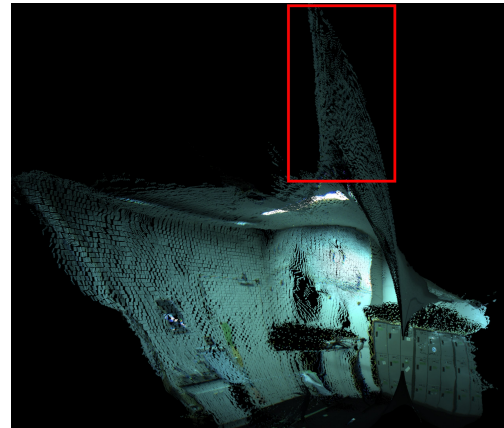
3.1 実験条件

本実験では，定量的評価と定性的評価を行った．100枚のチェッカーボードを様々な角度から撮影し，7枚のチェッカーボードを撮影した正距円筒画像を用いて提案手法により回転行列と並進ベクトルを推定した．そして，残りの93枚の正距円筒画像と提案手法により得られた回転行列と並進ベクトルを用いて定量的評価を行った．定量的評価では，再投影誤差と平面性誤



(a) Conventional method (b) Proposed method

Fig. 5 Reprojection images



(a) Conventional method



(b) Proposed method

Fig. 6 Front view of point clouds

差，直線性誤差をRMSEで評価した．定性的評価では，Fig.4(a) に示すような上カメラで撮影した画像を下カメラへ再投影した再投影画像と Fig.4(b) に示すような平行化により補正された上下画像を用いた3次元点群を定性的に評価した．

3.2 実験結果

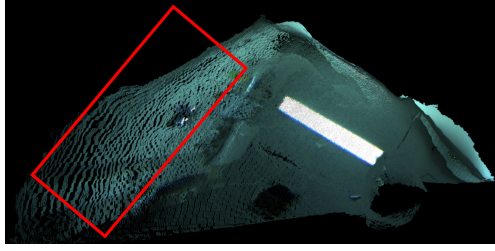
実験結果を Table1, Fig.5-8 に示す．Table1 は再投影誤差と平面性誤差，直線性誤差を提案手法と従来手法，それぞれの誤差を1つずつ用いた場合のRMSEで評価した結果を表している．Fig.5では，Fig.4(a) に示す上カメラで撮影した画像を提案手法と従来手法で得られたそれぞれの回転行列と並進ベクトルを用いて下カメラへ再投影した結果を表している．Fig.6-8では，Fig.4(b) に示すような環境において3次元計測した結果を正面方向と横方向，上方向のそれぞれの角度から点群で表示した結果である．

Table1 より，それぞれの誤差において従来手法とそ



(a) Conventional method (b) Proposed method

Fig. 7 Side view of point clouds



(a) Conventional method



(b) Proposed method

Fig. 8 Up view of point clouds

それぞれの誤差のみを考慮に行った結果よりも提案手法で行った結果の方が誤差が減少していることが分かる。特に、再投影誤差について提案手法が一番減少していることが分かる。再投影誤差のみを考慮した場合においても再投影誤差が大幅に減少しているが、直線性誤差が増加していることが分かる。また、平面性誤差のみまたは直線性誤差のみを考慮して行った結果、従来手法と比較し、大きく誤差が減少していないことが分かる。これらより、平面性誤差と直線性誤差が大きく減少していないことから上下カメラ間の回転成分は従来手法で得られたものと大きく変わらないことが考えられる。そして、平面性誤差と直線性誤差が大きく変化していないにもかかわらず再投影誤差が大幅に減少していることから上下カメラ間の並進成分が大きく変化していることが考えられる。そこで、従来手法と提案手法のそれぞれの手法によって得られた回転行列と並進ベクトルは以下のようにになっている。従来手法で得られた回転行列 R_c と並進ベクトル t_c はそれぞれ

$$R_c = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.005 & 0.013 \\ -0.005 & 1.000 & 0.000 \\ -0.013 & 0.000 & 1.000 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$t_c = \begin{pmatrix} 0.015 \\ 0.999 \\ -0.029 \end{pmatrix} \quad (12)$$



(a) Conventional method (b) Proposed method

Fig. 9 Rectified images

となっている。提案手法で得られた回転行列 R_p と並進ベクトル t_p はそれぞれ

$$R_p = \begin{pmatrix} 1.000 & -0.004 & 0.015 \\ 0.005 & 1.000 & -0.004 \\ -0.015 & 0.004 & 1.000 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$t_p = \begin{pmatrix} 0.002 \\ 0.073 \\ 0.005 \end{pmatrix} \quad (14)$$

となっている。これらの結果より、回転行列は大きく変化していないが、並進ベクトルの y 成分の値が大きく変化していることが分かる。よって、並進ベクトルの y 成分が大きく変化したことが再投影誤差を大幅に減少させた原因であると考えられる。光軸方向が水平に取り付けられ、カメラ間の回転がないように取り付けられている場合、理想的には並進ベクトルの y 成分は基線長と同じになるはずである。本実験に用いた魚眼縦ステレオカメラの基線長は $0.072m$ である。そのため、提案手法により得られた並進ベクトルは従来手法で得られた並進ベクトルより正確であることが分かる。

Fig.5 より、Fig.4(a) に示すような実際に得られた下カメラの画像と比較し、従来手法よりも提案手法の方が正確に再投影を行うことが出来ていることが分かる。これは先述したように並進ベクトルの y 成分が大きく変化したことが原因であると考えられる。また、Fig.4(a) と Fig.5(b) を比較した際、ほぼ正確に再投影を行えていることから提案手法によって得られた回転行列と並進ベクトルは真値に近い値であることが考えられる。

Fig.6-8 より、従来手法と比較して提案手法では歪みがあるが、赤い枠で囲んでいるような大きな誤差なく3次元復元を行えていることが分かる。従来手法と提案手法のそれぞれで得られた回転行列と並進ベクトルを用いて補正された上画像を Fig.9 に示す。Fig.9 より、並進ベクトルが大きく変化しているにもかかわらず補正された画像は大きく変化していないことが分かる。そのため、3次元復元された点群において誤差が減少している原因として直線性誤差が減少したことが影響していると考えられる。魚眼縦ステレオカメラの場合、正距円筒画像において対応するエポポーラ線は直線になる。そのため、ステレオマッチングを行う際に対応点探索がより精度良く出来たことが考えられる。しかし、提案手法で得られた点群において、歪みは残っている。Fig.5 で得られた結果より、回転行列と並進ベクトルに誤差が多くあるという可能性は低いと考えられる。そのため、ステレオマッチングにおいて誤差があると考えられる。

4. 結言

本論文では、再投影誤差と平面性誤差、直線性誤差を考慮した反復的な方法で回転行列と並進ベクトルを推定する手法を提案した。実験により、再投影誤差を大幅に減少させることが出来た。3次元復元された点群において、従来手法よりも大きな誤差なく3次元復元を行うことが出来たが、歪みが残っている。

今後の展望として、他の手法と比較することで有用性を示すことや3次元復元において定量的な評価を行うことで有用性を示すこと、距離を最適化させることでより精度良く3次元計測を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] Christian Häne, Lionel Heng, Gim Hee Lee, Alexey Sizov, and Marc Pollefeys. “Real-Time Direct Dense Matching on Fisheye Images Using Plane-Sweeping Stereo”. *2014 2nd International Conference on 3D Vision*. Vol. 1. pp. 57–64. 2014.
- [2] Julien Moreau, Sebastien Ambellouis, and Yassine Ruichek. “Equisolid Fisheye Stereovision Calibration and Point Cloud Computation”. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 167–172. 2013.
- [3] Steffen Abraham and Wolfgang Förstner. “Fish-eye-stereo calibration and epipolar rectification”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 59. No. 5. pp. 57–64. 2014.
- [4] Akira Ohashi, Fumito Yamano, Gakuto Masuyama, Kazunori Umeda, Daisuke Fukuda, Kota Irie, Shuzo Kaneko, Junya Murayama, and Yoshitaka Uchida. “Development of ranging method for inter-vehicle distance using visible light communication and image processing”. *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. pp. 535–540. 2017.
- [5] Hirota Iida, Yonghoon Ji, Kazunori Umeda, Akira Ohashi, Daisuke Fukuda, Shuzo Kaneko, Junya Murayama, and Yoshitaka Uchida. “High-accuracy Range Image Generation by Fusing Binocular and Motion Stereo Using Fisheye Stereo Camera”. *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. pp. 343–348. 2020.
- [6] Hikaru Chikugo, Kento Arai, Sarthak Pathak, and Kazunori Umeda. “Fisheye Stereo Camera using Fisheye Vertical Stereo Method”. *2024 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2024)*. pp. 3512–3518. 2024.
- [7] Richard I. Hartley. “In Defense of the Eight-Point Algorithm”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 19. No. 6. pp. 580–593. 1997.
- [8] Davide Scaramuzza, Agostino Martinelli, and Roland Siegwart. “A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras”. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 5965–5701. 2006.
- [9] Donald W. Marquardt. “An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters”. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. Vol. 11. No. 2. pp. 431–441. 1963.