

# 魚眼縦ステレオ法による高精度魚眼ステレオカメラの構築

○新井健斗 †, 筑後光 ‡, Sarthak Pathak ‡, 梅田和昇 ‡

○ Kento ARAI †, Hikaru CHIKUGO ‡, Sarthak PATHAK ‡ and Kazunori UMEDA ‡

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

‡: 中央大学理工学部, {chikugo@sensor., pathak@, umeda@}mech.chuo-u.ac.jp

<要約> 本論文では、魚眼ステレオカメラを用いた広範囲 3 次元計測手法を対象とする。通常のカメラを横方向に 2 台配置したステレオ計測では、基線長方向の計測精度低下から、画像左右端の計測精度低下につながる。また、従来の魚眼ステレオ計測では、歪に沿ったテンプレートマッチングを行うことから誤マッチングの増加につながった。そこで、魚眼カメラを縦に配置し、基線長を縦方向にすることで左右方向の計測精度向上を実現させる。また、直線に沿ったエピポーラ線にすることで、テンプレートマッチングの際の誤マッチングを減らし高精度なステレオ計測を実現させる。

<キーワード> 魚眼ステレオカメラ, 魚眼縦ステレオ法, 3 次元計測, 広視野センシング

## 1 序論

近年、自動運転に関する技術の進歩は目覚ましく、すでに実用化に至っているケースも多数存在する。中でも、運転支援システムは日本国内でも数多く普及している。これらのシステムでは、障害物検知などを目的とした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、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する。魚眼カメラは視野角が約  $180^\circ$  と非常に広角なため、1 台で広範囲に計測が可能となる。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]。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簡単化した [2]。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 [3]。これらの研究では、対応点探索の簡単化のため、魚眼画像から透視投影画像の変換を行っている。しかし、変換の際に画像周辺部で引き伸ばしが発生し、周辺領域でのステレオマッチングが困難となる。

また、Roxas らのように Variational Fisheye Stereo (VFS) 法を用いることで、魚眼カメラに対し歪補正を行わない研究もある [4]。しかし、VFS 法では微小変異を大域的に反復最適化するため、大きな変異が発生する近距離での測距や細かい構造の計測が困難である。

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 次元計測を実現している [5]。しかし、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 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ている [6]。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から基線長の方向により左右端の計測精度が不十分である。本研究では、魚眼画像によるステレオ計測について配置の工夫により簡便なステレオマッチングかつ左右端の精度向上を目指す。

## 2 提案手法

まず、上下のカメラから魚眼画像を取得し正距円筒画像に変換する。得られた上下の正距円筒画像から視差を用いたステレオ計測を行うことで距離計測を行う。

視差取得の際に、カメラを縦に配置した魚眼縦ステレオ法を用いる。

### 2.1 正距円筒画像への変換

本研究では、魚眼画像を正距円筒画像に変換することで歪の影響を抑えたステレオ計測を実現する。ただし、実際に出力される画像は誤差が生じているため、画像補正によって誤差の影響を低減する。そこで、カメラの性質を表す内部パラメータを考慮することで誤差の影響を低減した画像補正を行う。内部パラメータ推定には Scaramuzza らの提案した OcamCalibToolbox を用いる [7]。実際に画像を変換した結果が図 1 である。画像縦方向の歪みが除去されている様子が分かる。

### 2.2 ステレオ平行化

2 台のカメラで距離計測を行うとき、簡単化のため各々のカメラの光軸と基線を垂直にすることが一般的である。これを平行ステレオという。実際には、各々のカメラの光軸と基線は完全には垂直になっていないため、ステレオ平行化により補正をする。ステレオ平行化の手順を以下に示す。

#### 1. 画像間の対応点を求める

特徴点の抽出には AKAZE[8] を用いる。AKAZE は、照明や回転の変化にロバストな特徴点抽出手法である。また、得られた特徴点から kNN 法 [9] により特徴点マッチングを行い、二画像間の対応点を求める。

#### 2. 運動パラメータの推定

マッチングにより得られた対応点をもとにカメラ間の運動パラメータを求める。運動パラメータはカメラ間の位置・姿勢を表す。はじめに、得られた対応点から 5 点アルゴリズム [10] により基礎行列を算出する。その後、基礎行列からカメラ間の

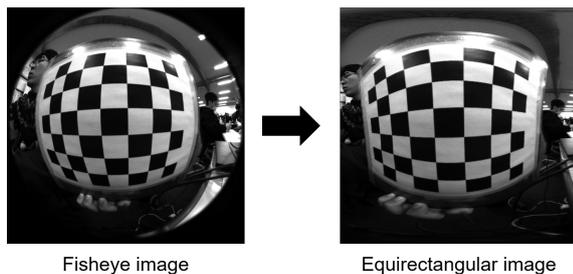


図 1 正距円筒画像

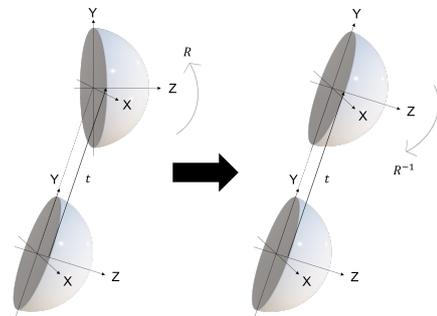
運動パラメータを求めることで上側のカメラから見た下カメラの位置、姿勢である並進ベクトル  $t$ 、回転行列  $R$  を求める。

#### 3. 運動パラメータを用いた 3 次元座標の回転による平行化

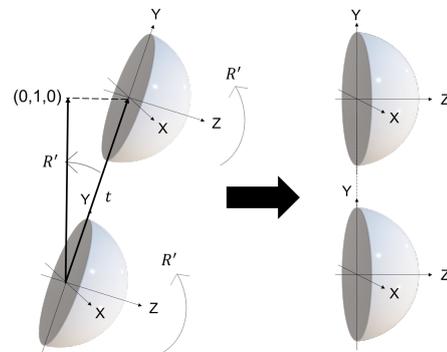
得られた運動パラメータから、カメラ画像の 3 次元座標を回転することでステレオ画像の平行化を行う [11]。処理の概要を図 2 に示す。はじめに、正距円筒画像から方位角、仰角をもとに 3 次元の半球面に投影した 3 次元座標を得る。半球面上に投影された 3 次元座標から、図 2(a) のように回転行列を用いて 3 次元座標の姿勢変換を行う。その後、図 2(b) のように並進ベクトルを用いて座標軸の変換を行うことで、3 次元座標が平行な状態になる。最後に 3 次元座標を正距円筒画像に再度投影することで画像が平行化される。

### 2.3 魚眼縦ステレオ法

一般に、ステレオ計測においてカメラを左右に置くことで視差を求める。しかし、環境の横方向エッジを



(a) 回転行列を用いた姿勢変換



(b) 並進ベクトルを用いた座標軸の変換

図 2 画像の 3 次元座標の変換による平行化

抽出したい場合に、カメラを縦に配置することで視差を求める研究もある [12]。本研究では、魚眼ステレオカメラについてカメラを縦に配置する魚眼縦ステレオ法により視差を求める。魚眼縦ステレオ法のメリットについて述べる。

### 2.3.1 基線長の向きによる画像左右端の精度向上

図3に示す通り、ステレオカメラは基線長の向きにより画像位置ごとの距離計測精度が大きく変化する。本研究では、車載用途を考えれば画像左右端の距離精度が上下端に比べて重要となる。カメラを縦に配置することで、基線長の方向により左右端の精度向上が見込まれる。

### 2.3.2 直線に沿ったテンプレートマッチング

正距円筒画像は、画像横方向には歪がそのまま残ってしまうが縦方向には歪が低減される。従来の魚眼ステレオ [5] では、歪に沿ったエピポーラ線でテンプレートマッチングを行ったため、誤マッチングが増加し精度低下につながったと考えられる。本手法では、水平方向には歪が生じるが垂直方向には歪が発生しない正距円筒画像の特性から、簡単にエピポーラ線を直線にすることができる。なお、左右にカメラを配置した場合にもエピポーラ線を直線にすることはできるが、正距円筒画像を作成する際に、画像を90°回転させる必要があり追加の処理が必要となってしまう。エピポーラ線を直線にすることで、テンプレートマッチングの際の誤マッチング低減が見込まれる。エピポーラ線の様子を図4に示す。

### 2.4 魚眼縦ステレオ法による3次元計測

魚眼縦ステレオ法により上下の画像から視差を求める。テンプレートマッチングの際の類似度の評価には

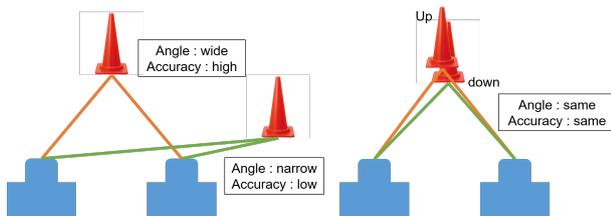


図3 画像位置による距離計測精度の変化

Sum of Absolute Difference(SAD)を用いる。求めた視差から次式より計測対象までの距離を算出する。

$$D = b \frac{\cos \phi_d}{\sin \Delta \phi} \quad (1)$$

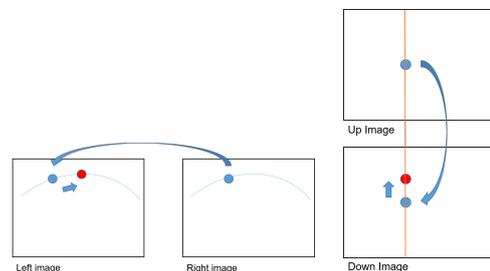
ただし、 $\phi_u$ ,  $\phi_d$ は各カメラの仰角、 $b$ は基線長、 $\Delta \phi$ は視差仰角、 $D$ は上カメラから計測対象までの距離値を表す。

## 3 精度評価実験

提案した魚眼縦ステレオ法の有用性について調べる。比較対象は左右にカメラを置いた魚眼ステレオ計測 [5] とする。本実験では3DCGソフトBlenderを使用し、仮想環境で正距円筒画像をレンダリングし入力画像とした。

### 3.1 定性的評価のための実験

各手法での距離精度について定性的に評価するための実験を行った。図5(a)を入力画像とし、図5の(c), (d)に各手法の計測結果を示す。色が赤いほど近く、青いほど遠くを示している。なお、図5(b)はBlenderより得られた真値である。提案手法が従来手法に対し、画像端において真値に近い結果となっていることが確認できる。基線長の方向により画像端の視差角の誤差が低減したためと考えられる。また、従来手法に対し床面では密な結果となっている。これは、今回使用した正距円筒画像のエッジが画像横方向に多かったためと考えられる。また、従来手法に対し密な結果となっている。これは、今回使用した正距円筒画像のエッジが画像横方向に多かったためと考えられる。



(a) 横ステレオでのエピポーラ線 (b) 縦ステレオでのエピポーラ線

図4 正距円筒画像におけるテンプレートマッチングの様子

### 3.2 定量的評価のための実験

次に、定量的評価の実験を行った。画像中の仰角を  $0^\circ$  で一定とし方位角  $-60^\circ, 0^\circ, 60^\circ$  の3か所を計測位置として図6に示す正方形ブロックを置いた。ブロックの一边を1mとし、ブロックまでの距離1m, 3m, 5m, 7m, 9mの5箇所を計測した。各ブロック箇所を計測された全点に対して、Blenderで得られる真値と各計測により得られた距離値の平均絶対誤差(MSE)を比較する。図7に距離1mにおける各計測箇所での距離結果、図8に各距離でのMSEの比較を示す。結果から、各距離でMSEが低下していることが分かる。特に、方位角  $-60^\circ, 60^\circ$  の画像左右端で大きな精度向上が見られた。基線長の方向を変えることによる画像左右端の精度向上が確認できた。また、方位角  $0^\circ$  の画像中心でも精度が向上していることが確認できる。エピソード線が直線になったことで誤マッチングが減ったためと考えられる。

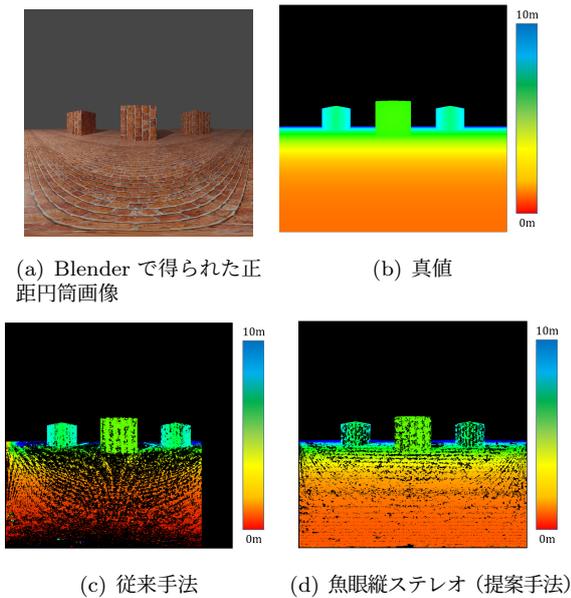


図5 各手法による計測結果

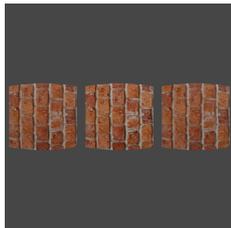
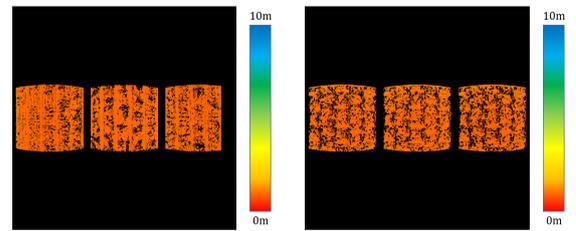


図6 距離1mでの各計測箇所

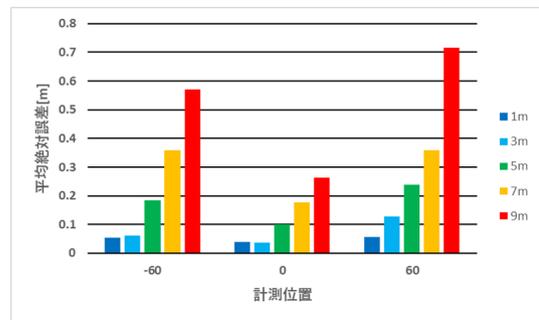
### 4 実環境実験

提案した縦ステレオ法が実環境において有効か確認するために実機を用いた実験を行った。カメラはFLIR社のBlackfly, 魚眼レンズはEdmund Optics社のフィッシュアイレンズを用いた。カメラの解像度は  $1048 \times 1048$  pixel, 基線長は72mm, 画角は水平方向, 垂直方向ともに  $180^\circ$  である。屋内で撮影した画像で定性的評価を行う。実際の環境の様子を図9(a)に, 計測結果を図9(b)に示す。全体的にノイズが多く乗った結果となっている。これは, パラメータ補正の際の誤差がテンプレートマッチングに影響したためと考えられる。また, 画像中央部のターゲットに注目すると, 縦方向のエッジは上手く計測できてない一方で, 横方向のエッジは

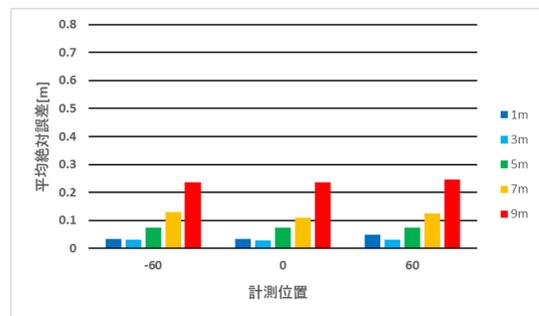


(a) 従来手法 (b) 魚眼縦ステレオ(提案手法)

図7 1mでの距離計測結果



(a) 従来手法



(b) 魚眼縦ステレオ(提案手法)

図8 各距離でのMSE

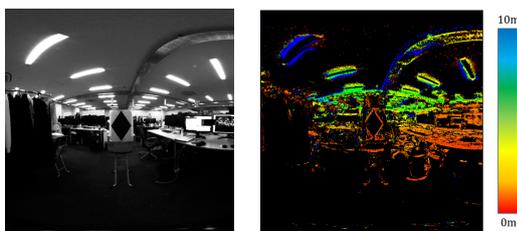
ステレオ計測ができています。基線長を縦方向にしたことにすることで横方向エッジを上手く計測できている様子が分かる。

## 5 結論

本論文では、魚眼カメラを縦に配置した魚眼縦ステレオ法を提案した。また、従来手法との比較実験により提案手法の有用性を示した。今後の展望としては、画像の再投影最適化を行うことで誤マッチングを低減させ精度向上を行う。また、平行化を精度良く行うことで実環境での計測を高精度に行う。

## 参考文献

- [1] C. Hane, L. Heng, G.H. Lee, A. Sizov, and M. Pellaey, “Real-time direct dense matching on fisheye images using plane-sweeping stereo”, Proceedings of the 2014 2nd International Conference on 3D Vision, pp.57-64(2014)
- [2] S. Abraham, and W. Forstner, “Fish-eye stereo calibration and epipolar rectification”, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.59, no.5 pp.278-288(2005)
- [3] J. Moreau, S. Ambellouis, and Y. Ruichek, “Equisolid fisheye stereovision calibration and point cloud computation”, Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp.167-172(2013)
- [4] M. Roxas and T. Oishi, “Variational fisheye stereo”, IEEE Robotics and Automation Letters, vol.5, no.2, pp.1303-1310(2020)



(a) 実験環境

(b) 計測結果

図 9 実環境での計測結果

- [5] 大橋明, 山野史登, 増山岳人, 梅田和昇, 福田大輔, 入江耕太, 金子修造, 村山純哉, 内田吉孝, “正距円筒画像への変換を用いた魚眼ステレオカメラの構築”, 精密工学会誌, Vol.83, No.12, pp.1095-1100 (2017)
- [6] 飯田浩貴, 池勇勳, 梅田和昇, 大橋明, 福田大輔, 金子修造, 村山純哉, 内田吉孝, “魚眼ステレオカメラにおける異なる計測手法の融合”, 第24回ロボティクスシンポジウム予稿集, 5B4, pp.277-280 (2019)
- [7] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Silegwart, “A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras”, in Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5695-5701(2006)
- [8] P. F. Alcantarilla, J. Nuevo, and A. Bartoli, “Fast explicit diffusion for accelerated features in non-linear scale spaces”, in Proceedings of the British Machine Vision Conference, (2013)
- [9] T. M. Cover, and P. E. Hart, “Nearest neighbor pattern classification”, IEEE Transactions on Information Theory, vol.13, iss.1, pp.21-27(1967)
- [10] D. Nister, “An Efficient Solution to the Five-Point Relative Pose Problem”, in Proceedings of the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.26, iss.6, pp.756-770(2004)
- [11] S. Pathak, A. Moro, A. Yamashita, and H. Asama, “A decoupled virtual camera using spherical optical flow”, in Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, September 2016.
- [12] 塩原守人, 此島真喜子, 宮崎望: “縦ステレオ法による前方車間距離計測システムの開発”, テレビジョン学会技術報告, Vol.20, No.49, pp13-18(1996)