

広視野3次元センシングのための魚眼縦ステレオ法

Vertical Fisheye Stereo for Wide-Angle 3D Sensing

精密工学専攻 3号 新井健斗
Kento Arai

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° 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単純化した⁽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、対応点探索の単純化のため、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測距が困難である。

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簡便なステレオマッチングかつ左右端の精度向上を実現する魚眼縦ステレオ法を提案する。

2. 提案手法の概要

提案手法の概要をFig. 1に示す。まず、魚眼画像を正距円筒画像に変換し歪みを低減した画像を生成する。生成された正距円筒画像をステレオ平行化によりカメラ間

の位置・姿勢の補正を行う。魚眼カメラを縦に配置し、画像縦方向のエピポーラ線に沿ってテンプレートマッチングを行い視差を得る。得られた視差から距離を算出する。

3. 魚眼ステレオカメラ

3.1 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。そこで、内部パラメータ推定に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Fig. 2である。画像縦方向の歪みが除去されている様子が見える。

3.2 ステレオ平行化

2台のカメラで距離計測を行うとき、単純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

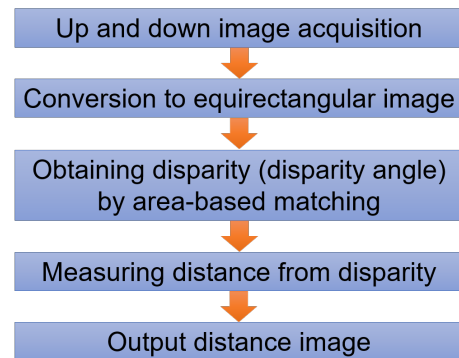


Fig.1 The flow of the proposed method.

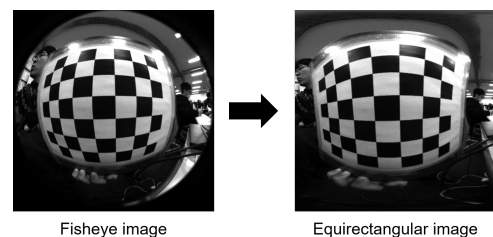


Fig.2 Transformation from fisheye image to equirectangular image.

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. 画像間の対応点の対応付け

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。処理の概要を Fig. 3 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、Fig. 3(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、Fig. 3(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。

4. 魚眼縦ステレオ法

4.1 魚眼縦ステレオ法

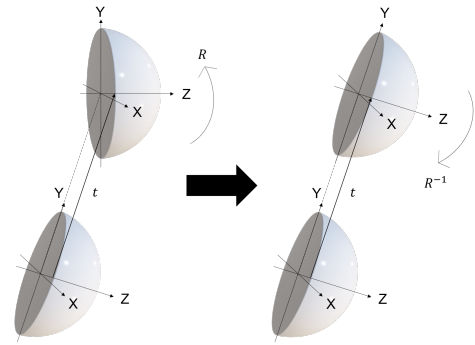
一般に、ステレオ計測においてカメラを左右に置くことで視差を求める。しかし、環境の横方向エッジを抽出したい場合に、カメラを縦に配置することで視差を求める研究もある⁽¹¹⁾。本研究では、魚眼ステレオカメラについてカメラを縦に配置する魚眼縦ステレオ法により視差を求める。魚眼縦ステレオ法のメリットについて述べる。

4.1.1 基線長の向きによる画像左右端の精度向上

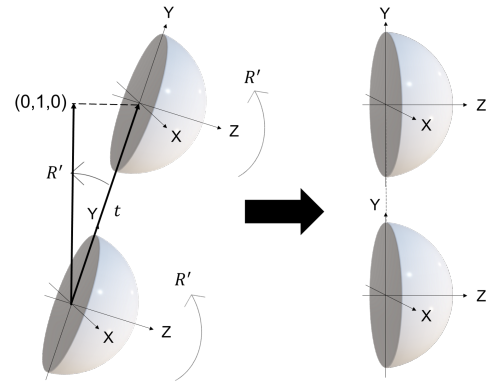
Fig. 4 に示す通り、ステレオカメラは基線の向きにより画像位置ごとの距離計測精度が大きく変化する。物体とセンサを結んだ直線 (Fig. 4 のオレンジ及び緑の線) と基線がなす角度が小さいほど視差が小さくなり、視差が小さいほど視差計測の際に誤差が乗りやすくなるためである。本研究では、車載用途を考慮するため画像左右端の距離精度が上下端に比べて重要となる。カメラを縦に配置することで、基線の方向により左右端と正面の視差が同等となる。そのため、カメラを横に並べた場合に比べ左右端の距離計測精度向上が見込まれる。

4.1.2 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い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、曲線に沿ったエピポーラ線でテンプレートマッ

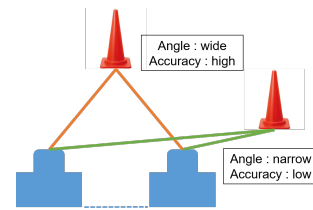


(a) Pose transformation using a pose matrix

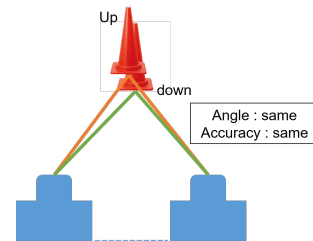


(b) Transformation of coordinate axis using position vector

Fig.3 Rectification of fisheye stereo camera



(a) Obstacles in front and side



(b) Obstacles in front and above

Fig.4 Change in distance accuracy depending on image position

チングを行ったため誤マッチングが起り精度低下につながったと考えられる。カメラを縦に配置することでエピポーラ線が直線になり、対応点探索の際の誤マッチング低減が見込まれる。エピポーラ線を Fig. 5 に示す。

4.2 対応点の探索

魚眼縦ステレオ法により上下の画像から視差を求める。対応点探索にはテンプレートマッチングを用いる。類似度の評価には Sum of Absolute Difference (SAD) を用いる。エピポーラ線が直線方向であるため、テンプレートマッチングの走査方向は上下方向（正確には上方向）になる。

4.3 魚眼縦ステレオ法による 3 次元計測

求めた視差から各計測点における距離 D を算出する。魚眼縦ステレオ法では Fig. 6 より得られる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、 ϕ_u 、 ϕ_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。

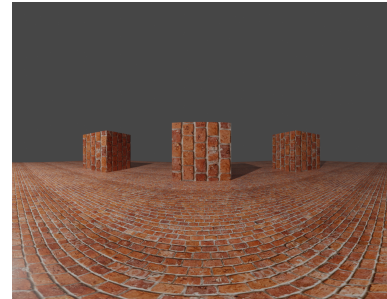
5. 精度評価実験

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。

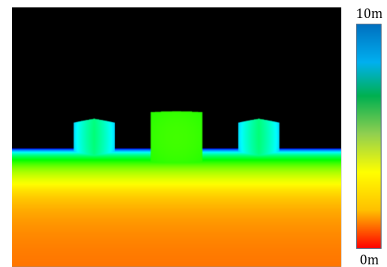
5.1 定性的評価実験

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。Fig. 7(a) を入力画像とし、Fig. 7 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

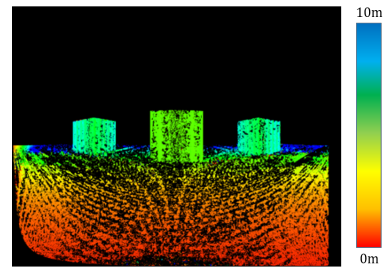
ほど遠くを示している。なお、Fig. 7(b) は Blender より得られた真値である。提案手法が従来手法に対し、画像端において真値に近い結果となっていることが確認できる。基線長の方向により画像端の視差角の誤差が低減したためと考えられる。また、従来手法に対し床面では密な結果となっている。これは、今回使用した正距円筒画像のエッジが画像横方向に多かったためと考えられる。



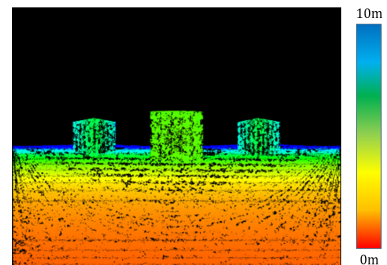
(a) Equirectangular image obtained by Blender



(b) True value



(c) Conventional method



(d) Vertical fisheye stereo (Proposed method)

Fig.7 Measurement results by each method

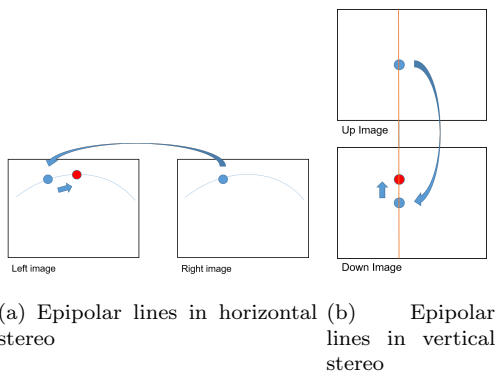


Fig.5 Template matching in an equirectangular image

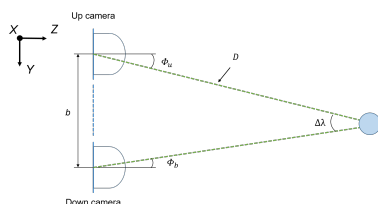


Fig.6 Relation between measurement object and camera

5.2 定量的評価実験

次に、定量的評価の実験を行った。画像中の仰角を 0° で一定とし方位角 -60° , 0° , 60° の3か所を計測位置としてFig. 8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箇所で計測した。各ブロック箇所で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を比較する。Fig. 9に距離1mにおける各計測箇所で距離結果、Fig. 10に各距離の計測結果の比較を示す。結果から、各距離で平均絶対誤差が低下していることが分かる。特に、方位角 -60° , 60° 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° の画像中心でも精度が向上していることが確認できる。エピポーラ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。

6. 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の減少、精度向上を行う。さらに、実環境での実験を行うことで有効性を確認していく。

参考文献

- (1) Hane C., Heng L., Lee G. H., Sizov A., and Pellafeys M., Real-time direct dense matching on fisheye images using plane-sweeping stereo, in *Proceedings of the 2014 2nd International Conference on 3D Vision*, (2014) pp. 57-64.
- (2) Abraham, S. and Forstner, W., Fish-eye stereo calibration and epipolar rectification, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 59, no. 5 (2005) pp. 278-288.
- (3) Moreau, J., Ambellouis, S., and Ruichek, Y., Equisolid fisheye stereovision calibration and point cloud computation, in *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (2013) pp. 167-172.
- (4) Roxas M. and Oishi, T., Variational fisheye stereo, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, (2020) pp. 1303-1310.
- (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 (2017) pp.1095-1100.
- (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, (2019) pp.277-280.
- (7) Scaramuzza, D., Martinelli, A., and Sliedright, R., A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras, in *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2006) pp. 5695-5701.
- (8) Alcantarilla, P. F., Nuevo, J., and Bartoli, A., Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces, in *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, (2013).
- (9) Cover T. M., and Hart P. E., Nearest neighbor pattern classification, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 13, iss. 1 (1967) pp. 21-27.
- (10) Nister D., 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) 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 (1996) pp.13-18

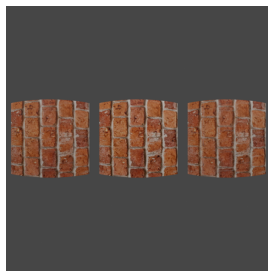


Fig.8 Each measurement point at 1m distance

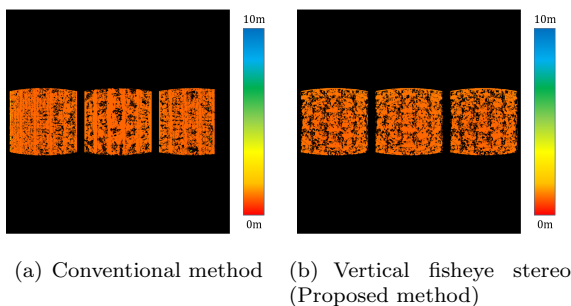
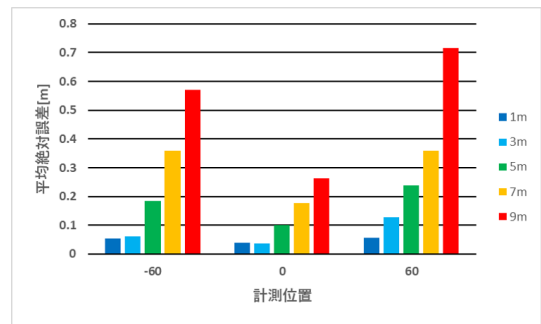
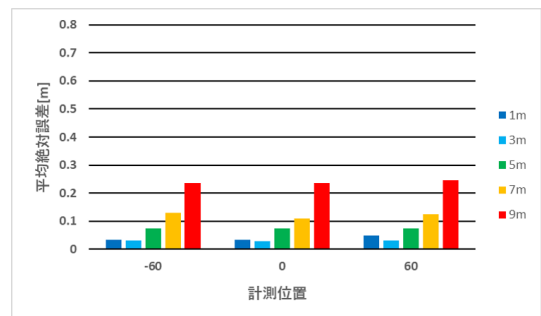


Fig.9 Each measurement results at 1m distance



(a) Conventional method



(b) Vertical fisheye stereo (Proposed method)

Fig.10 Measurement results at each distance