

擬似バイラテラルフィルタによる 魚眼ステレオカメラの性能向上

Performance Improvement of Fisheye Stereo Camera by Bilateral-like Filter

精密工学専攻 3号 飯田浩貴
Hirotaka Iida

1. 序論

近年、距離センサを用いた自動車の運転支援システムの研究開発が活発になっている。その代表的なセンサとして、ステレオカメラ、レーザ、ソナーなどがある。しかし、これらのセンサには距離計測範囲の狭さや計測密度の低さといったデメリットが存在する。これに対し、本研究では魚眼カメラに着目する。魚眼カメラの画角は 180° 以上であり、そのサイズも比較的小さいことから車載に適している。従来研究として以下のような研究がある。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によって、ステレオマッチングを単純化した⁽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構築した⁽²⁾。これらの研究では、対応点探索を単純化するために、魚眼画像を透視投影画像に変換している。しかし、変換の際に画像の周辺部が引き伸ばされるため、周辺領域でのステレオマッチングが困難となってしまう。この問題に対し、大橋らは正距円筒画像への変換を用いた魚眼ステレオカメラを提案している⁽³⁾。画像周辺部を引き伸ばさない画像変換で、魚眼画像の歪みの低減と対応点探索の単純化を実現している。しかし、内部、外部パラメータの誤差の影響で誤マッチングや距離精度に課題を残している。そこで、本研究では同一フレームの画像を扱う2眼ステレオだけでなく、時系列画像を扱うモーションステレオにも着目する。一般的に、2眼ステレオでは領域ベースマッチングが、モーションステレオでは特徴ベースマッチングが用いられる⁽⁴⁾。領域ベースマッチングは画像全体で適用が可能なので密なデータが求まる一方、特徴ベースマッチングでは、画像中の特徴の強い点しか扱わないので疎なデータとなるが、誤マッチングの可能性は減るといったメリットも存在する⁽⁵⁾。本研究では2眼ステレオにモーションステレオの融合を試み、計測密度の高さを維持したまま魚眼ステレオカメラの高精度化を目指す。

2. 処理の概要

本研究ではFig. 1に示す手順で計測を行う。まず環境中で魚眼ステレオカメラを光軸方向に直進させ、2フレームのステレオ画像を得る。取得した画像に対して、2眼ステレオ計測、モーションステレオ計測を各々行う。最後に、2つの計測結果を後述する擬似バイラテラルフィルタを用いて統合する。

3. 魚眼ステレオカメラの2眼ステレオ

3.1 魚眼カメラモデル

魚眼レンズの射影方式には等距離射影、立体角射影などがある。しかし、実際の魚眼カメラは理想的な射影方式には従わない。そこで本論文では、Scaramuzzaらが提案した汎用的な全方位カメラモデルを用いる⁽⁶⁾。チェッカーパターンを複数撮像した魚眼画像を用いてカメラの内部パラメータの算出を行い、魚眼画像の歪み補正に用いる。

3.2 正距円筒変換

本論文では、魚眼画像をFig. 2に示す正距円筒変換を行ってからステレオマッチングを行う。正距円筒画像は横軸と縦軸を方位角 λ と仰角 ϕ にとった等間隔な座標に投影するため、引き伸ばしや歪みの少ない画像を生成できる。

3.3 正距円筒画像のステレオマッチング

2眼で距離計測を行うとき、単純化のため各々の光軸と基線長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、各々の光軸と基線長は完全に垂直になっていないため、ステレオ平行化により、そ

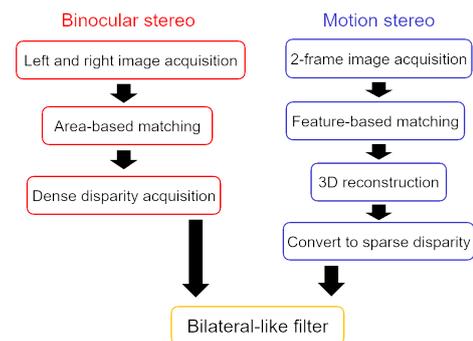


Fig.1 Flow chart of the proposed method.

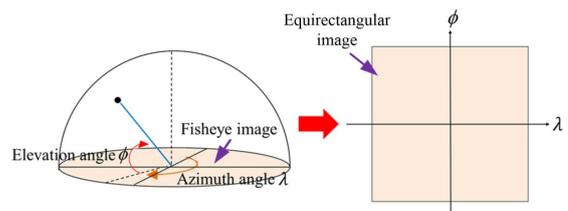


Fig.2 Transformation from fisheye image to equirectangular image.

のずれ分を計算し、補正する。ステレオによって距離計測を行うには、左右の画像中から対応点を探索するステレオマッチングを行う必要がある。このとき、処理時間の短縮と誤マッチングの減少のためにエピソード線上のみを探索する。正距円筒画像のエピソード線は曲線になる。方位角 λ が 0 のときの仰角を ϕ_0 としたとき、正距円筒画像上のエピソード線の軌跡は次式ようになる。

$$\phi = \tan^{-1}(\tan \phi_0 \cos \lambda) \quad (1)$$

4. 魚眼ステレオカメラのモーションステレオ

4.1 特徴点抽出

時系列画像間での対応点探索では、画像の明るさや見えの変化が激しいので、領域ベースよりも特徴ベースのマッチングが適している。そこで、本研究では AKAZE によって特徴点を検出する⁽⁷⁾。AKAZE は画像の回転、スケール、輝度の変化に頑健な特徴量の抽出が可能であり、移動するカメラから得られた画像に対して有効である。また、AKAZE は矩形のウィンドウ上で特徴検出器の極値を探索するため、魚眼画像と比較して画像中の位置による変化が少ない正距円筒画像を用いることが適している。

4.2 3種類のマッチング

特徴ベースマッチングでは、画像中の特徴の強い点しか利用しないため、疎なデータになる。本研究では画像全体で特徴点を得るために、Fig. 3 に示すように、2 フレームのステレオ画像（計 4 枚）の時刻 t における右画像を基準とした 3 種類のマッチングを行う。このマッチングにより、特徴ベースのデメリットである計測密度の低さがある程度補強することができる。

4.3 運動パラメータ

2 画像間でのカメラの運動パラメータは、回転行列 R と並進ベクトル t で表される。まず、4.2 節で得られた対応点群から 5 点アルゴリズムを用いて基本行列 E を計算する⁽⁸⁾。このとき、RANSAC により外れ値に対してロバストに計算が行われる。続いて、 E を特異値分解することで R と t を求める。

4.4 3次元復元

特徴点の透視投影座標 (x, y) と 3次元座標 (X, Y, Z) の関係はカメラの運動パラメータで構成される透視投影行

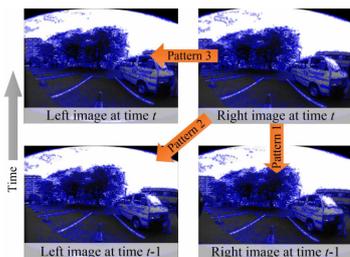


Fig.3 Three types of matching of stereo image pairs.

列 P を用いて次式で表せる。

$$\tilde{x} \sim P\tilde{X} \quad (2)$$

このときの \sim は同次座標として等しいことを表す。式 (2) にマッチングで得られた 2 組の透視投影座標と透視投影行列を代入すると、以下のように整理される。

$$B\mathbf{X} = \mathbf{b} \quad (3)$$

従って、最適な 3次元座標 $\hat{\mathbf{X}} = (\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$ は以下の最小 2 乗法によって求められる。

$$\hat{\mathbf{X}} = B^+\mathbf{b} \quad (4)$$

ただし、 B^+ は擬似逆行列である。4.2 節で得られた対応点群は 3 組となるので、この計算を 3 回繰り返す。この 3 組は全て同じ画像（時刻 t における右正距円筒画像）を基準に復元しているため、その結果を一緒に扱う。

以上により、3次元座標が得られるが、画像のみを用いた 3次元復元では実際のスケールは得られない。そこで、本研究では路面平面推定によるスケール合わせを行う⁽⁹⁾。

5. 擬似バイラテラルフィルタによる異なる計測手法の融合

3章では密な視差、4章では特徴点ごとの視差が得られるので、この 2つを上手く融合する手法を提案する。なお、本手法はバイラテラルフィルタ⁽¹⁰⁾ に似ているため擬似バイラテラルフィルタと呼ぶ。

5.1 空間方向と視差方向の重み

注目画素 (u, v) とその周辺の特徴点 (u_k, v_k) までの距離を d_k 、2眼ステレオで得た各画素の視差を $D_{disp(b)}$ 、モーションステレオで得た特徴点ごとの視差を $D_{disp(m)}$ とする。空間方向と視差方向に応じたガウス分布に従う重み w_{bk} を以下の式で定義する。

$$w_{bk} = \exp\left(-\frac{d_k^2}{2\sigma_1^2}\right) \exp\left[-\frac{(D_{disp(b)} - D_{disp(m)})^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (5)$$

$$d_k = \sqrt{(u_k - u)^2 + (v_k - v)^2} \quad (6)$$

ここで、 σ_1 は空間方向の重み、 σ_2 は視差方向の重みを表すガウス分布の標準偏差である。重み付き平均の概念図を Fig. 4 に示す。注目画素からしきい値 d_{th} 以下の範囲に特徴点が存在しない場合、その画素の視差は不定とする。

5.2 基線長の向きを考慮した重み

本研究では、Fig. 3 に示した 3 種類のマッチングで得られた点群を同一に扱う。よって、マッチングの種類ごとに基線長の向きが異なることになる。基線長の向きが変わると、画像位置によって距離精度が大きく変わる。そこで重み w_{pk} をマッチングの種類 Pattern 1~3 ごとに以

下のように定義する.

・ Patten 1

$$w_{pk} = -\exp\left[-\frac{(u_k - \frac{width}{2})^2}{2\sigma_3^2}\right] + 1 \quad (7)$$

・ Patten 2

$$w_{pk} = -\exp\left[-\frac{(u_k - \frac{width}{2} - \alpha)^2}{2\sigma_3^2}\right] + 1 \quad (8)$$

・ Patten 3

$$w_{pk} = \exp\left[-\frac{(u_k - \frac{width}{2})^2}{2\sigma_3^2}\right] \quad (9)$$

ここで, $width$ は画像の横幅, σ_3 は空間方向の重みを表すガウス分布の標準偏差である. α は, Fig. 3 中の基線長が斜めのときの光軸とのなす角度である.

5.3 補間による視差の推定

特徴点を用いた補間により, 各画素の視差を決定する. 各画素の視差 \hat{D}_{disp} は次式で計算される.

$$\hat{D}_{disp} = \frac{\sum_{k=1}^n w_{bk} w_{pk} D_{disp(m)k}}{\sum_{k=1}^n w_{bk} w_{pk}} \quad (10)$$

この処理により, 計測精度の高い特徴ベースの計測結果を領域ベースの連続性を参照しつつ平均化することができる.

6. 距離精度評価

6.1 実験条件

提案手法の定量的評価を屋外環境で行った. カメラは FLIR 社の Flea3, 魚眼レンズは SPACE 社の TV1634M を用いた. 魚眼レンズの内部パラメータは MATLAB の OcamCalib Toolbox を利用して推定した⁽⁶⁾. カメラの解像度は 1328×1048 pixel, 基線長は 52 mm, 画角は水平方向 165° , 垂直方向 132° である. モーションステレオは, カメラを光軸方向に 0.15 m 前進させたときの 2 フレームを用いた. この移動距離は, 駐車時の平均時速 (10 km/h) と駐車支援システムに必要なフレームレート

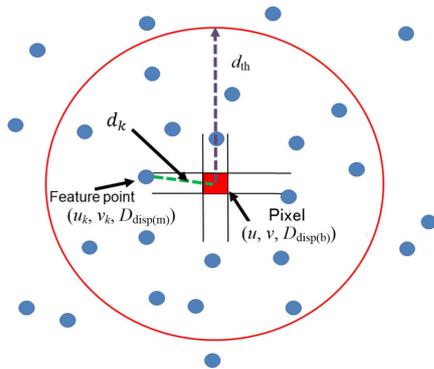


Fig.4 Calculating weighted average.

(20 fps) から導出した. この条件のとき, 式 (8) における α は 18.43° になる. 擬似バイラテラルフィルタで扱われる他の各パラメータは Table 1 の通りである. 実験環境と計測箇所を色分けした図を Fig. 5 に示す. 計測距離は 1, 5, 10 m とし, 白黒の紙を計測対象とした. 計測は, 注目点と上下 1 点ずつの計 3 点の計測を 4 回繰り返す, 得られた計 12 点の誤差の平均と標準偏差で評価した.

6.2 実験結果

Fig. 6 に画像中心の計測距離 1 m における距離画像の比較を示す. 提案手法では, 誤マッチングの減少に加え, 遠距離の距離精度の改善が見られる. これは, モーションステレオの移動距離がステレオカメラの基線長の 3 倍ほどあることが寄与していると考えられる. Fig. 7~9 に誤差の平均と標準偏差を示す. 棒グラフの色は Fig. 5(b) の計測箇所に対応している. 距離 1 m では, 2 眼ステレオ単体の方が距離精度が高かった. このことから, 近距離においてはステレオカメラの基線長サイズが適しており, モーションステレオの移動距離は逆に大きすぎると考えられる. 距離 5 m では, 提案手法の精度が高かった. また, 距離 10 m においても提案手法の距離精度が全体的に高かったが, 画像中心の精度は低かった. これは, 距離 10 m ではステレオカメラの基線長サイズでは小さ過ぎると考えられる.

Table 1 Parameters for bilateral-like filter.

Parameter	
Distance threshold d_{th} [pixel]	12
Standard deviation σ_1 [pixel]	6
Standard deviation σ_2 [pixel]	5
Standard deviation σ_3 [pixel]	83

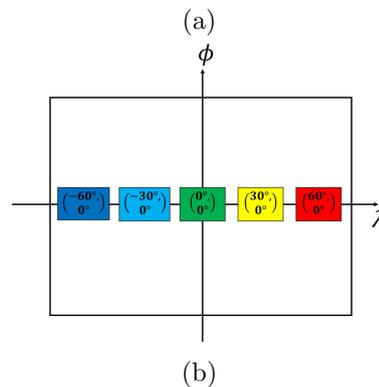
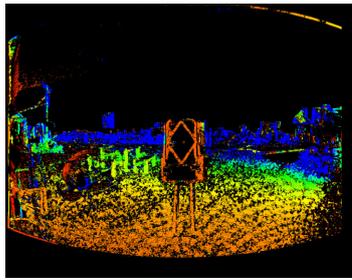
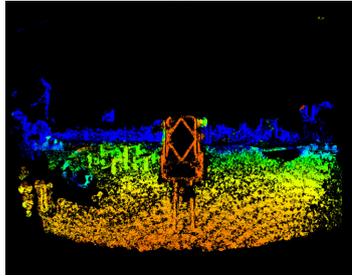


Fig.5 Experimental conditions: (a) outdoor environment and (b) measurement points.



(a)



(b)

Fig.6 Comparison of range images: (a) without bilateral-like filter and (b) with bilateral-like filter. Color represents distance values from 0 m (red) to 10 m and above (blue).

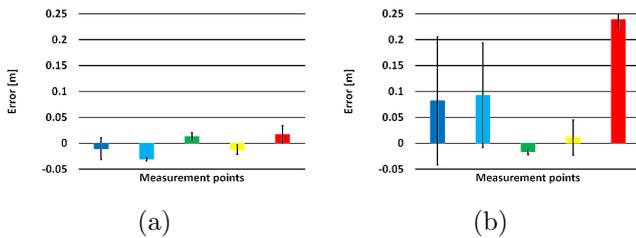


Fig.7 Mean and standard deviation of errors at distance 1 m: (a) without bilateral-like filter and (b) with bilateral-like filter.

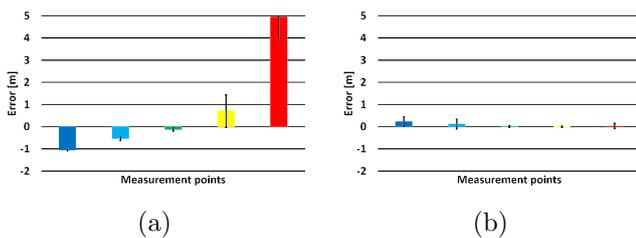


Fig.8 Mean and standard deviation of errors at distance 5 m: (a) without bilateral-like filter and (b) with bilateral-like filter.

提案手法の屋外環境での処理時間は 490~730 ms であった。この処理時間は、運転支援アプリケーションとしては長過ぎるため改善が必要である。

7. 結論

本論文では、魚眼ステレオカメラにおいて、2種類のステレオ計測結果を融合した距離計測を実現した。融合手法として、空間方向と視差方向に加え、基線長の向き

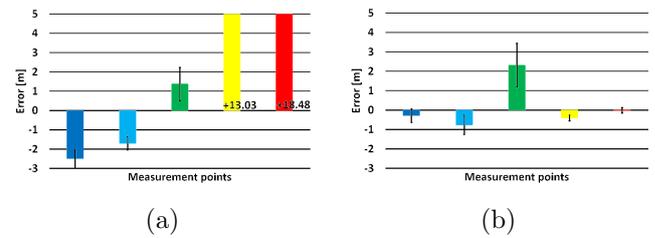


Fig.9 Mean and standard deviation of errors at distance 10 m: (a) without bilateral-like filter and (b) with bilateral-like filter.

を考慮する重み付き平均化を行う擬似バイラテラルフィルタを提案した。擬似バイラテラルフィルタにより、誤マッチングの減少と遠距離精度の改善が可能であることを示した。

今後の展望としては、処理時間の短縮を行い、運転支援向けの実用的なアプリケーションの開発を目指す。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 後藤真一, 川西亮輔, 山下淳, 金子透, 二眼ステレオとモーションステレオを併用した全方位ステレオカメラによる3次元計測, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集* (2010) 1A2-E29.
- (5) Jayanthi, N. and Indu, S., Comparison of image matching techniques, *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, vol. 7, issue 3 (2016) pp. 396-401.
- (6) 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.
- (7) 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).
- (8) 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 (2004) pp. 756-770.
- (9) Yamaguchi, K., Kato, T., and Ninomiya, Y., Moving Obstacle Detection using Monocular Vision, in *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (2006).
- (10) Tomasi, C. and Manduchi, R., Bilateral filtering for gray and color images, in *Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Computer Vision*, (1998) pp. 839-846.