

魚眼ステレオカメラにおける異なる計測手法の融合

飯田 浩貴^{*1}, 池 勇勲^{*2}, 梅田 和昇^{*2},
大橋 明^{*3}, 福田 大輔^{*3}, 金子 修造^{*3}, 村山 純哉^{*3}, 内田 吉孝^{*3}

Fusion of Different Measurement Methods in Fisheye Stereo Camera

Hiroataka IIDA^{*1}, Yonghoon JI^{*2}, Kazunori UMEDA^{*2}, Akira OHASHI^{*3},
Daisuke FUKUDA^{*3}, Shuzo KANEKO^{*3}, Junya MURAYAMA^{*3}, and Yoshitaka
UCHIDA^{*3}

^{*1} Course of Precision Engineering, School of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*2} Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*3} Clarion
7-2 Shintoshin, Chuo-ku, Saitama-city, Saitama 330-0081, Japan

This paper proposes methods that fuse different stereo measurements in fisheye stereo camera. Stereo measurement methods can be divided into two types: a binocular and a motion stereo. In general, the accuracy of distance measurements depends on the direction of the baseline of the cameras. In case of the binocular stereo, the direction of the baseline is horizontal. On the other hand, in the case of the motion stereo, the direction of the baseline changes depending on the direction of the camera motion. Therefore, in the two stereo measurements, the accuracy in the position of the image is different. In addition, a method to search corresponding points is different between them. In this paper, it is attempted to fuse the two stereo measurements. The proposed methods are verified by experiments in indoor environment.

Key Words : Fisheye stereo camera, Reference disparity map, Bilateral-like filter

1. 緒 言

近年、カメラや距離センサを用いた自動車の運転支援システムのための研究開発が活発になっている。これらのセンサは距離計測範囲の狭さや計測密度の低さにより死角が存在することが問題となっている。この問題に対して、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⁽¹⁾。しかし、内部、外部パラメータの誤差の影響により誤マッチングや距離画像計測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。一般的に対応点探索の際、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ことが多い。また、車は直進移動することが多いので、モーションステレオの基線長の方向が2眼ステレオと異なり、その結果、

計測位置による不確かさが異なることになる。これを利用し、本研究ではモーションステレオから得られた視差マップをリファレンスとする視差探索範囲の限定と、空間方向と視差方向に対して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、魚眼ステレオカメラの高精度化と誤マッチングの減少を目指す。

2. 魚眼ステレオカメラの2眼ステレオ⁽¹⁾

2.1 正距円筒画像 魚眼画像から正距円筒画像へ変換する概念図を図1に示す。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作成できる。

2.2 計測値の3次元位置 正距円筒画像のエピポーラ線は曲線になる。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ポーラ線の軌跡は次式のようにになる。

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

このとき、リアルタイム性を重視し、領域ベースマッチングとしてブロックマッチングを適用し、その評価

^{*1} 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27) iida@sensormech.chuo-u.ac.jp

^{*2} 中央大学理工学部精密機械工学科

^{*3} (株)クラリオン (〒330-0081 埼玉県さいたま市中央区新都心7-2)

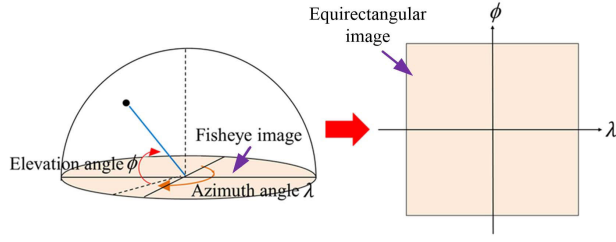


Fig. 1 Transformation from fisheye image to equirectangular image: (a) fisheye image and (b) equirectangular image.

値として SAD (Sum of Absolute Difference) を用いる。対象物と魚眼ステレオカメラとの距離として右カメラからのユークリッド距離を用いる。基線長を b ，左右カメラの視差方位角を $\Delta\lambda$ ，左カメラから対象物までの方位角を λ_l ，右カメラから対象物までの仰角を ϕ_r とすると，計測距離 D は次式で計算できる。

$$D = \frac{b}{\sin \Delta\lambda} \frac{\cos \lambda_l}{\cos \phi_r} \quad (2)$$

3. 魚眼ステレオカメラのモーションステレオ⁽²⁾

まずはじめに，AKAZE を用いて正距円筒画像上で特徴点を検出する⁽³⁾。また，2枚の画像間で特徴点をマッチングして対応点を得る際，画像全体で対応点を得るために図2に示すように時刻 t における右正距円筒画像を基準とした3回のマッチングを行うことで対応点数を増やす。次に，Structure from Motion (SfM) を用いて対応点からカメラ間の外部パラメータを推定する。このとき，フレーム間の移動距離を既知とすることでスケール不定性を解消する。特徴点の画像座標 (u, v) と3次元座標 (X, Y, Z) の関係はカメラの外部パラメータで構成される透視投影行列 P を用いて次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

このときの $\sim$ は同次座標として等しいことを表す。上式にマッチングで得られた対応点組を代入し，最小2乗法により3次元座標を求める。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のでその結果を統合する。

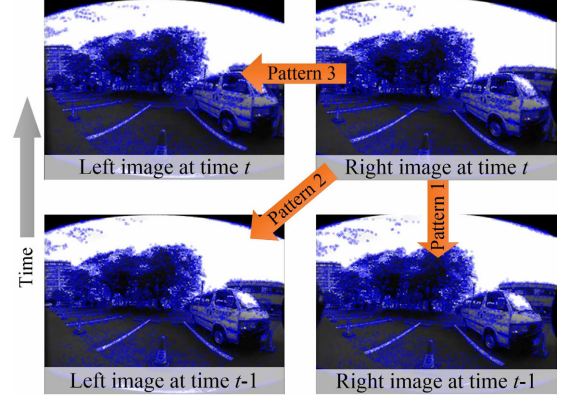


Fig. 2 Three types of matching of stereo image pairs.

4. 2種類のステレオ計測結果の融合

本章では，2眼ステレオとモーションステレオの計測結果を融合する2つの手法を提案する。なお，2つの手法はそれぞれ独立して適用することとする。

4.1 リファレンスの視差マップによる視差探索範囲の限定 2眼ステレオにおける対応点探索では，一般的にテンプレートマッチングが用いられる。テンプレートマッチングでは，探索範囲をある一定の値として探索することが多い。これに対し，本研究ではモーションステレオから得られた距離値を2眼ステレオの距離計算式で視差に変換し，対応点探索のリファレンスとすることで誤マッチングを減らす。

4.1.1 リファレンスの視差マップの作成 モーションステレオは特徴ベースでマッチングしており，画像中の特徴の強い点のみで処理を行っているため誤マッチングに対して頑健であると考えられる。そこで，本研究では特徴点での視差を2眼ステレオで対応点探索の際のリファレンスとする。各画素の周囲にある特徴点を用い，画素と特徴点との距離 d_k に応じて重み w_k を与えた重み付き平均により全画素に対する距離値を算出する。特徴点 (u_k, v_k) の距離値 D_{dist} から画素 (u, v) の距離値 D_{ref} は次式のように求まる。

$$D_{\text{ref}} = \frac{\sum_{k=1}^n w_k \cdot D_{\text{dist}}}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (4)$$

$$w_k = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp \left\{ -\frac{d_k^2}{2\sigma_1^2} \right\} \quad (5)$$

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

ここで， σ_1 は空間方向の重みを表すガウス分布の標準偏差である。注目画素の視差を求める周囲の特徴点

は、注目画素からしきい値 d_{th} 以下の距離の点とする。 n はこのときの特徴点の数である。 D_{ref} を視差へ変換することで、密な視差マップを作成する。

4.1.2 視差探索範囲の限定 4.1.1 項で得られた密な視差の近傍のみで対応点を探索することで誤マッチングを防ぐ。ある定数を k とすると、視差探索範囲は以下ようになる。

- $disp \geq k$ の場合

$disp \sim disp + k$ と $disp \sim disp - k$ を探索範囲とする。

- $0 < disp < k$ の場合

$disp \sim 2disp$ と $disp \sim 0$ を探索範囲とする。

- $disp = 0$ の場合

$0 \sim 1pixel$ を探索範囲とする。

4.2 擬似バイラテラルフィルタ 2眼ステレオの密な視差と特徴点ごとの視差を融合する手法を提案する。重み付けを注目画素と周辺の特徴点までの距離に加えて、注目画素の視差と周辺の特徴点の視差の差に応じて行う。この手法はバイラテラルフィルタ⁽⁴⁾を模範としているので擬似バイラテラルフィルタと呼ぶ。各画素の視差は、その画素 (u, v) と周辺の特徴点 (u_k, v_k) までの距離 d_k (式 (6)) と、注目画素における2眼ステレオから得られた視差と周辺の特徴点におけるモーションステレオから得られた視差の差に応じた重み w_k を与えた平均により算出する。すなわち、各画素の視差 $\hat{D}_{disp}$ を次式で求める。

$$\hat{D}_{disp} = \frac{\sum_{k=1}^n w_k D_{disp(m)}}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (7)$$

$$w_k = \exp\left(-\frac{d_k^2}{2\sigma_1^2}\right) \exp\left(-\frac{(D_{disp(b)} - D_{disp(m)})^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (8)$$

ここで、 $D_{disp(b)}$ は2眼ステレオで得た視差、 $D_{disp(m)}$ はモーションステレオで得た視差、 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。

5. 実験

5.1 実験条件 魚眼ステレオカメラの外観を図3(a)に示す。距離精度を評価する箇所を赤枠で囲んだものを図3(b)に示す。本棚までの光軸方向距離が1mであり、赤枠で囲んだ画素に対してカメラからのユークリッド距離を真値とした。真値に対する誤差の絶対値の分布数の割合で距離精度を評価した。モーションステレオはカメラを光軸方向に0.15m移動させたときの2フレームの画像を用いた。また、4.1.2項の説明に基づく探索範囲の限定を行い、 $k = 5pixel$ とした。注目画素から特徴点までの距離のしきい値と空間方向、視差方向の標準偏差は表1の通りとした。

5.2 実験結果 対応点探索範囲の限定における距離画像の比較を図4に、擬似バイラテラルフィルタにおける距離画像の比較を図5に示す。また、距離値が取れた画素数に対する誤差の絶対値の分布数の割合を表2, 3に示す。図4より、画像中心付近の遠距離と誤計測している点が無くなっていることから誤マッチングの減少が確認できる。また、表2で $0.5 \leq error$ の割合が減少していることから誤マッチングに効果があることが確認できる。次に、図5より画像中心付近の誤マッチングを除去できており、左端の距離精度が改善されていることが分かる。これは、基線長が光軸方向であるモーションステレオの計測結果が重み付き平均化により活かされていると考えられる。表3で擬似バイラテラルフィルタにより精度の高い点の割合 ($0.05 \leq error < 0.1$) が上昇している一方、誤差の大きい点の割合 ($0.5 \leq error$) が減少しているので誤マッチングを除去できていることが分かる。

Table 1 Parameters for each experimental condition: Condition 1 is for restricting corresponding points search range and Condition 2 is for bilateral-like filter.

Parameter	Condition 1	Condition 2
Distance threshold d_{th} [pixel]	30	20
Standard deviation σ_1 [pixel]	15	10
Standard deviation σ_2 [pixel]	/	10

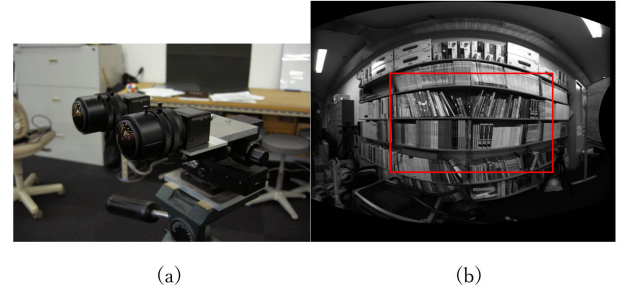


Fig. 3 Experimental conditions: (a) fisheye stereo camera and (b) captured image including bookshelf.

Table 2 Ratio of error range(restricting search range)

Error range[m]	w/o method[%]	w/ method[%]
$0 \leq error < 0.05$	23.11	27.11
$0.05 \leq error < 0.1$	43.30	45.09
$0.1 \leq error < 0.2$	14.99	17.53
$0.2 \leq error < 0.5$	8.18	8.84
$0.5 \leq error$	10.41	1.42

Table 3 Ratio of error range(bilateral-like filter)

Error range[m]	w/o method[%]	w/ method[%]
$0 \leq \text{error} < 0.05$	25.76	42.59
$0.05 \leq \text{error} < 0.1$	48.22	33.30
$0.1 \leq \text{error} < 0.2$	15.35	18.77
$0.2 \leq \text{error} < 0.5$	4.77	3.56
$0.5 \leq \text{error}$	5.91	0.02

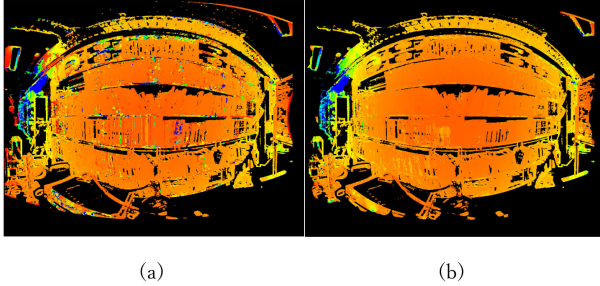


Fig. 4 Comparison of range images: (a) without and (b) with restricting corresponding points search range. Color represents distance values from 0 m (red) to 10 m (blue).

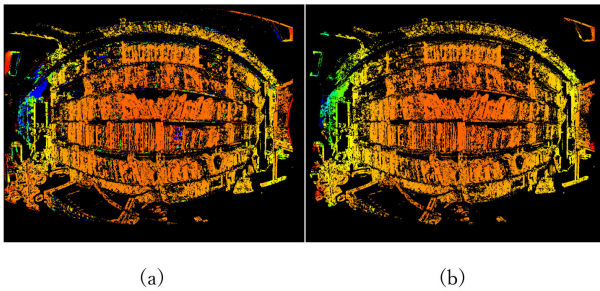


Fig. 5 Comparison of range images: (a) without and (b) with bilateral-like filter. Color represents distance values from 0 m (red) to 10 m (blue).

6. 結 言

本論文では、モーションステレオ計測と2眼ステレオ計測を融合する2つの手法を提案した。視差探索範囲の限定により誤マッチングの減少が確認できた。擬似バイラテラルフィルタにより、画像中の位置によって距離精度の向上ならびに誤マッチングの除去ができることを示した。今後は、屋外環境での定量的評価を行う予定である。

参 考 文 献

- (1) 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.
- (2) 飯田 浩貴, 山野 史登, 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

ラの複数ステレオ画像対を用いた距離画像計測”, 第24回画像センシングシンポジウム, IS3-09(2018).

- (3) P. F. Alcantarilla, J. Nuevo, and A. Bartoli, “Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces”, *Proceedings of British Machine Vision Conference*, (2013).
- (4) C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral Filtering for Gray and Color Images”, *Proceedings of 1998 IEEE 6th International Conference on Computer Vision*, (1998), pp.839–846.