

# 日本機械学会論文集 Transactions of the JSME (in Japanese)

# 魚眼ステレオカメラの2眼ステレオと モーションステレオの融合による距離画像計測

飯田 浩貴<sup>\*1</sup>,池 勇勳<sup>\*2</sup>,梅田 和昇<sup>\*3</sup> 大橋 明<sup>\*4</sup>,福田 大輔<sup>\*4</sup>,金子 修造<sup>\*4</sup>,村山 純哉<sup>\*4</sup>,内田 吉孝<sup>\*4</sup>

# Measurement of range images using a fisheye stereo camera by fusing binocular and motion stereo

Hirotaka IIDA<sup>\*1</sup>, Yonghoon JI<sup>\*2</sup>, Kazunori UMEDA<sup>\*3</sup>, Akira OHASHI<sup>\*4</sup>, Daisuke FUKUDA<sup>\*4</sup>, Shuzo KANEKO<sup>\*4</sup>, Junya MURAYAMA<sup>\*4</sup> and Yoshitaka UCHIDA<sup>\*4</sup>

 \*1 Course of Precision Engineering, School of Science and Engineering, Chuo University 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan
 \*2,\*3 Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

\*4 Clarion

7-2 Shintoshin, Chuo-ku, Saitama-shi, Saitama 330-0081, Japan

# Received: 22 February 2019; Revised: 18 April 2019; Accepted: 5 June 2019

#### Abstract

This paper proposes a method that fuses two kinds of stereo measurements using a fisheye stereo camera. A stereo measurement method can be divided into two types: binocular and motion stereo. Generally, the accuracy of long range depends on the baseline of the camera. In case of the binocular stereo, the direction of the baseline is horizontal. Its size is small due to the convenience of installation conditions. By contrast, in the case of the motion stereo, the direction of the baseline changes depending on the direction of the camera motion. For example, the direction of the baseline is the optical axis when a stereo camera is mounted on a vehicle or a mobile robot that drives in the forward direction. When the speed is high such as in driving, its baseline becomes larger as it becomes the moving distance between frames. Therefore, between the two stereo measurements there are differences in the magnitude of the baseline and the uncertainty of the position in the image. In addition, the area-based approach is used for binocular stereo and the feature-based approach is used for motion stereo at the time of corresponding point search. So, robustness against false matching is different. In this paper, we try to fuse the two stereo measurements in order to realize more accurate range image generation. A method, which restricts the disparity search range using the reference disparity map and a bilateral-like filter, which is a weighted averaging are proposed for fusing the two stereo measurements. The proposed methods are verified by experiments in indoor and outdoor environments.

*Keywords* : Fisheye stereo camera, Equirectangular image, Binocular stereo, Motion stereo, Reference disparity map, Bilateral-like filter



No.19-00069 [DOI:10.1299/transjsme.19-00069], J-STAGE Advance Publication date : 13 June, 2019

<sup>\*1</sup> 学生員,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)

<sup>\*2</sup> 正員, 中央大学理工学部精密機械工学科

<sup>\*3</sup> 正員,フェロー,中央大学理工学部精密機械工学科

<sup>\*4</sup> クラリオン(株) (〒330-0081 埼玉県さいたま市中央区新都心 7-2)

E-mail of corresponding author: iida@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

# 1. 緒 言

近年,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(Perng et al., 2017) (Sasaki et al., 2015). 代表的なセンサとしては, ステレオカメラ, レーザレンジファインダ, 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うデメリットがあり死角が存在している ことが問題となっている.これに対し,本研究では魚眼ステレオカメラに着目する.魚眼カメラの画角は 180 度以 上であり,そのサイズも小さいことから車載に適していると考えられる.また,ステレオカメラはカメラを2つ用 いることにより密な距離画像計測が可能となる.よって,魚眼カメラを2つ用いて魚眼ステレオカメラを構築す ることによって広角かつ密な距離画像計測が可能となる.従来研究として以下のような研究がある. Abraham ら (Abraham and Forstner, 2005)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 ングを簡単化した. Moreau ら(Moreau et al., 2013)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.しかし,この手法は計算コストが大きいため運転支援システムへの適用は困 難である.Hane ら(Hane et al., 2014)は,plane-sweeping 法を用いてリアルタイムでの 3 次元環境計測を実現し た. この他にも, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (Krombach et al., 2015) や車両 (Furgale et al., 2013) (Gehrig, 2005) (Kim et al., 2015) などの実用的なプラットフォームに魚眼カメラを用いた例も存在する. これらの研究で は、対応点探索を簡単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り、元の魚眼画像の画角と比較して検出範囲が 狭くなってしまう. この問題に対して, 大橋ら (Ohashi et al., 2016) (Ohashi et al., 2017) 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. 魚眼画像を方位角 λ と仰角 φ を横軸と縦軸においた直交座標系 の画像である正距円筒画像に変換することで魚眼画像の周辺部を引き伸ばすこと無く、魚眼画像の歪みの低減と 対応点探索の簡単化を実現している.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. 車載で扱われるカメラは移動している状態が多いため, 時系列画 像を用いた処理を導入することは妥当である.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. 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(Jayanthi and Indu, 2016). また,車は直進移動することが最も多いので,モーションステレオの基線長の大きさと方向が2眼ステレオと異 なり、それぞれの距離精度と計測位置による不確かさが異なることになる.実際にそのことを利用し、2眼ステレ オとモーションステレオの併用を試みた手法も存在する(後藤他, 2010).しかし,2眼ステレオの計測密度の高さ を活かしきれてはいない.そこで,本研究では計測密度の高さを維持したまま2眼ステレオとモーションステレ オの融合を試み、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.具体的には、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2つを提案する.探索範囲の限定は,より信頼できる復元結果を参照 しつつ距離計測を行うので誤マッチングに有効であると考えられる.実際に、高精度な復元が可能なエッジ点の 深度を基にステレオ計測を行う ELAS という手法が提案されている(Geiger et al., 2011). この手法では高精度な マッチングを実現した他, CPU 単体で1秒未満の処理時間を実現しているのでリアルタイム性も持ち合わせてい る.また,擬似バイラテラルフィルタはバイラテラルフィルタ(Tomasi and Manduchi, 1998)同様,幾何的特徴を 保持したままの平滑化が可能である. 類似研究としてトリラテラルフィルタが挙げられる (大石他, 2011). この 手法では、画素値だけでなく、ToF 距離センサから得られる距離値とリフレクタンス値を重み項に加えることでノ イズの除去に成功している.本研究では,上記2つの先行研究の考えを基にした手法で2眼ステレオとモーショ ンステレオの融合を試みる.

本論文の構成は以下の通りである.2章では既存の手法である2眼ステレオについて,3章ではモーションステ レオについて述べる.そして,4章では2章と3章の結果を融合するための2つの提案手法を示す.2つの提案手 法の流れを図1に各々示す.続いて,5章で今回行った実験について触れ,6章で結言を述べる.



Fig. 1 Flow chart of the proposed method: (a) restricting search range and (b) bilateral-like filter.

## 2. 魚眼ステレオカメラにおける2眼ステレオ

この章では,魚眼ステレオカメラにおける2眼ステレオ計測手法を説明する(Ohashi et al., 2016)(Ohashi et al., 2017).

## 2.1 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,製造過程において発生する誤差より, 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(Scaramuzza et al., 2006) が提案した誤差を考慮した全方位カメラモデルを用いる.チェッカーパターンを撮像した魚眼画像を多数用いてカ メラの内部パラメータの算出を行い,魚眼画像の歪みを補正する.

### 2·2 正距円筒画像

魚眼画像の歪みを除去するために透視投影画像に変換すると,図 2(a)(b) に示すように画像周辺部が大きく引き 伸ばされてしまう.引き伸ばされた部分は画質が悪くなり,ステレオマッチングにより対応点を求めることが困 難になる.そのため,本論文では魚眼画像を図 2(c) に示す正距円筒画像に変換してからステレオマッチングを行 う.魚眼画像から正距円筒画像へ変換する概念図を図 3 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.

#### 2.3 正距円筒画像におけるステレオマッチング

2眼で距離計測を行うには、各々の光軸と基線長が垂直である必要がある. 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は垂直になっていないため、ステレオ平行化により、そのずれ分を計算し、補 正する. そして、2眼の平行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ポーラ線上のみを 探索する. また、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<sub>0</sub> 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なる.

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

(1)

3

よって,正距円筒画像においては,対応点探索を図4に示す曲線上で行う.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,その評価値として SAD (Sum of Absolute Difference) を用いる.また,サブピクセル精度で視差を推定するために等角直線フィッティング (Shimizu and Okutomi, 2005) を行う.



Fig. 2 Fisheye image transformations: (a) fisheye image, (b) perspective image, and (c) equirectangular image.



Fig. 3 Transformation from fisheye image to equirectangular image.

#### 2.4 正距円筒画像における誤マッチング除去

ステレオマッチングにおいて,内部・外部パラメータの推定誤差や照明条件などの要因によって正しく対応が 求まらず誤った対応付けを行ってしまうことがある.これは誤マッチングと呼ばれ,障害物の認識などに悪影響 を及ぼすので,該当箇所を除外する必要がある.本論文では,以下の誤マッチング除去手法を用いる.

#### • Texture filter

テンプレート内の最大輝度差がしきい値未満の際に該当部分の距離算出を行わない. テクスチャの弱い部分は注 目点の周囲で誤マッチングを起こしやすいため,当該部分の計算を省略することで誤マッチングの除去および処 理コストの削減をはかる.

# • Peak filter

最終的にマッチングした部分の SAD のピークと比較して 1 pixel 分の左右のスコアの勾配がしきい値未満の際に 該当部分の距離算出を行わない.Texture filter と同様でテクスチャの弱い部分に有効.

#### • Minimum filter

最終的にマッチングした部分の SAD がしきい値より大きい際に該当部分の距離算出を行わない.明かな誤対応に 有効.

# Repetition filter

最終的にマッチングした部分と次に SAD が小さい部分を比較して差がしきい値未満の際に該当部分の距離算出を 行わない.レンガやフェンスのような、模様がくり返されているパターン上で対応点探索を行うと、正しいマッチ ング位置以外の箇所でも、SAD が同等に低い箇所が出てきてしまい、誤マッチングを起こしやすい.本手法では、 最も低い SAD とその次に低い SAD を比較し、差が少ない場合はくり返しパターンであると判断し、距離計測を 行わないものとする.

#### 2.5 計測値の3次元位置

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. 図5に示すように,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 $\lambda_l$ ,右カメラから対象物までの仰 角を $\phi_r$ とすると,計測距離Dは次式で計算できる.





Fig. 4 Epipolar line on equirectangular image.



Fig. 5 Measurement of distance on equirectangular image.

$$D = \frac{b}{\sin \Delta \lambda} \frac{\cos \lambda_l}{\cos \phi_r} \tag{2}$$

#### 3. 魚眼ステレオカメラにおけるモーションステレオ

この章では、モーションステレオによる距離計測手法について説明する(飯田他,2018). このプロセスは特徴 点抽出、3種類のマッチング、カメラ運動パラメータの計算、および3次元復元の4つのステップに分けられる.

#### 3.1 特徵点抽出

対応点探索の際,時系列画像間では画像の明るさや見えが変化し易いので,領域ベースよりも特徴ベースマッチ ングが適している.そこで,本研究ではAKAZE(Alcantarilla et al., 2013)によって特徴点を検出する.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撮像した画像に 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画像変形が少ない正距円筒画像を用いることが適していると考えられる.

#### 3.2 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 4·2·1 項で述べる手法の際、各画素の値を特徴点を用いた補間で求めるため、画像全体で特徴点を得る必要がある.そ こで、図6に示すように2フレームのステレオ画像の合計4枚の画像の時刻*t*における右正距円筒画像を基準と した3種類のマッチングを行うことで、画像全体で特徴点を取得する.

#### 3.3 カメラ運動パラメータの計算

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. これらのパラメータは、SfM (Structure from Motion)を用いて求める. 具体的には、3・2 節で得られた対応点群から基本行列 E を計算し、E を 特異値分解することで R と t を求める. ただし、SfM では並進ベクトルの実際のスケールを求めることはできない. 本研究では、カメラが車載を想定していることを踏まえて路面平面推定を用いたスケール合わせ(山口他、2005) を行う. ただし、スケール合わせを行うのは図 6 の Pattern1 と 2 とし、Pattern3 は基線長を用いることでスケール 不定性を解消する. なお、3・1 節で得られる特徴点は正距円筒座標 ( $\lambda$ ,  $\phi$ ) であるため、



Fig. 6 Three types of matching of stereo image pair.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan \lambda \\ \frac{\tan \phi}{\cos \lambda} \\ 1 \end{pmatrix}$$
(3)

により透視投影座標 (x, y, z) へ変換してから基本行列 E の計算を行う. 3·2 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.

# 3.4 3次元復元

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.

$$\tilde{\boldsymbol{u}} \sim \boldsymbol{P}\tilde{\boldsymbol{X}}$$
 (4)

ただし,

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \\ p_{21} \ p_{22} \ p_{23} \ p_{24} \\ p_{31} \ p_{32} \ p_{33} \ p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$
(5)

このときの~は同次座標として等しいことを表す.式(5)にマッチングで得られた2組の画像座標と透視投影行 列を代入すると、以下のように整理される.

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{X} = \boldsymbol{b} \tag{6}$$

ただし,

$$\begin{bmatrix} p_{31}u - p_{11} & p_{32}u - p_{12} & p_{33}u - p_{13} \\ p_{31}u - p_{21} & p_{32}u - p_{22} & p_{33}u - p_{23} \\ p'_{31}u' - p'_{11} & p'_{32}u' - p'_{12} & p'_{33}u' - p'_{13} \\ p'_{31}u' - p'_{21} & p'_{32}u' - p'_{22} & p'_{33}u' - p'_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14} - p_{34}u \\ p_{24} - p_{34}v \\ p'_{14} - p'_{34}u' \\ p'_{24} - p'_{34}v' \end{bmatrix}$$
(7)

(u, v) と(u', v') は 2 枚の画像間でマッチングして得られた各々の特徴点の座標である.  $p \ge p'$  は各々のカメラの 透視投影行列 P の要素である. 従って,最適な 3 次元座標  $\hat{X} = (\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$  は以下の最小 2 乗法によって求められる.

$$\hat{\pmb{X}} = \pmb{B}^+ \pmb{b}$$

[DOI: 10.1299/transjsme.19-00069]

(8)

$$\boldsymbol{B}^{+} = (\boldsymbol{B}^{\top}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\top}$$
<sup>(9)</sup>

ただし, **B**<sup>+</sup> は擬似逆行列である. 3·2 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ので,その結果を一緒に扱う.

#### 3.5 距離から視差への変換

3.4 節で得られた特徴点の復元結果を次式によりカメラからの距離値 Ddist に変換する.

$$D_{\rm dist} = \frac{Z}{\cos\phi\cos\lambda} \tag{10}$$

ただし, Z は光軸方向の距離である.次に D<sub>dist</sub> を 2 眼ステレオにおける距離計算式 (2) を用いて視差 D<sub>disp</sub> へと変換する.

$$D_{\rm disp} = \tan^{-1} \left( \frac{b \sin \widetilde{W}}{D_{\rm dist} \cos \phi_r - b \cos \widetilde{W}} \right) \tag{11}$$
$$\widetilde{W} = \frac{\pi u}{W} \tag{12}$$

ただし,Wは画像の横幅である.正距円筒画像は角度に対して等間隔に投影した座標であり,180度を画像の横幅に合わせているため式(12)のようになる.

### 4.2種類のステレオ計測結果の融合

この章では、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される.また、4.2節のベースは2眼ステレオ、4.3節のベースはモーションステレオとなっており、本論文はその違いを比較することも趣旨としている.

#### 4.1 ステレオ計測における長所と短所

2つのステレオ計測手法の長所・短所の比較を表1に示す.2つの計測手法はマッチングの手法が異なるので, 誤マッチングに対する頑健さが異なる(Jayanthi and Indu, 2016).また,基線長の方向と大きさも異なるので,計 測位置による不確かさや距離精度も異なることになる.

#### 4.2 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.このとき、照明条件などによっては誤マッチング が起きやすい.そこで、本研究ではモーションステレオから得られた視差を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.

#### 4.2.1 リファレンスの視差マップの作成

前述のとおり,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2眼ステレオと比べて誤マッチングが起きにくいと考えられる.そこで,本研究では3章で得ら れる特徴点での視差を2眼ステレオで対応点探索する際のリファレンスとする.このとき得られる視差は点ごと の視差であるので,そのままでは全画素に対して探索を行う領域ベースマッチングに適用できない.そこで,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*dk* に応じて重み*wk* を与えた重み付き平均により全画素

Table 1	Advantages and	disadvantages	of stereo	measurement	method
	U				

	Binocular stereo	Motion stereo
Matching method	Area-based	Feature-based
Measurement density	High	Low
Robustness against false matching	Low	High
Direction of baseline	Horizon	Optical axis

に対する距離値を算出する(Yamano et al., 2018).特徴点 (*u<sub>k</sub>*, *v<sub>k</sub>*)の距離値 *D*<sub>dist</sub> から画素 (*u*, *v*)の距離値 *D*<sub>ref</sub> は 次式のように求まる.

$$D_{\rm ref} = \frac{\sum_{k=1}^{n} w_k \cdot D_{\rm dist}}{\sum_{k=1}^{n} w_k} \tag{13}$$

$$w_{k} = \frac{1}{2\pi\sigma_{1}^{2}} \exp\left\{-\frac{d_{k}^{2}}{2\sigma_{1}^{2}}\right\}$$
(14)

$$d_k = \sqrt{(u_k - u)^2 + (v_k - v)^2} \tag{15}$$

重み付き平均の概念図を図 7(a) に示す. ここで, σ<sub>1</sub> 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*<sub>th</sub> 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. 注目画素からしきい値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. *D*<sub>ref</sub> を式 (11) を用いて視差へ変換することで, 密な視差マップを作成する.

### 4.2.2 視差探索範囲の限定

4.2.1 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.また,探索範囲が狭くなるので処理コストの削減も期待できる.具体的な探索方法を図8に示す.なお,4-2.1 項で得られた視差を4捨5入して整数値とした *disp* をリファレンスの視差値とする.ある定数を*k*とすると,視差探索範囲は以下のようになる.

•  $disp \ge k$ の場合

*disp~disp+kと disp~disp-k*を探索範囲とする. すなわち, 図 8(a)の探索 1, 2 を実施し, SAD の小さい方の 極小値を対応点とする.

● 0 < *disp* < *k* の場合

*disp*~2*disp* と *disp*~0 を探索範囲とする. すなわち, 図 8(b)の探索 1, 2 を実施し, SAD の小さい方の極小値を 対応点とする.

*disp* = 0 の場合

0~1 pixel を探索範囲とし, SAD が最小値の箇所を対応点とする.

なお, 視差は等角直線フィッティングによりサブピクセル精度で推定される.

4.3 擬似バイラテラルフィルタ

2章では密な視差,3章では特徴点ごとの視差が得られるので,この2つの視差を上手く融合する手法を考える. そこで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



Fig. 7 Calculating weighted average based on: (a) reference disparity map and (b) bilateral-like filter.



Fig. 8 Restricting corresponding points search range: (a)  $disp \ge k$  and (b) 0 < disp < k.

じて行う手法を提案する.この処理により,平均化される元の視差は精度の良いものであるので,2眼ステレオで 計測されている各画素での視差を参照しつつ,高い空間分解能で視差を求めることができる.この手法はバイラテ ラルフィルタ(Tomasi and Manduchi, 1998)に似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(15))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.

$$\widehat{D}_{\text{disp}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} w_k D_{\text{disp}(m)}}{\sum_{k=1}^{n} w_k}$$
(16)

$$w_k = \exp\left(-\frac{d_k^2}{2\sigma_1^2}\right) \exp\left(-\frac{(D_{\text{disp}(b)} - D_{\text{disp}(m)})^2}{2\sigma_2^2}\right)$$
(17)

重み付き平均の概念図を図 7(b) に示す.ここで, *D*<sub>disp(b)</sub> は2眼ステレオで得た視差, *D*<sub>disp(m)</sub> はモーションステレ オで得た視差, σ<sub>2</sub> は視差方向の重みを表すガウス分布の標準偏差である.注目画素からしきい値以下の範囲に特 徴点が存在しない場合,その画素の視差は不定とする.求められた視差より式 (2) から距離を求める.

# 5. 実 験

#### 5·1 実験機器

魚眼ステレオカメラの 2 台のカメラは 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(Scaramuzza et al., 2006) を利用して推定した. 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. 魚眼ステレオカメ ラの外観を図 9 に示す.



Fig. 9 Fisheye stereo camera.

#### 5·2 屋内実験

屋内実験は本棚を計測対象とした. 距離精度を評価する箇所を赤枠で囲んだ図を図 10 に示す. 本棚までの光軸 方向の距離が 1 m であり,赤枠で囲んだ画素に対して式 (10) で計算したカメラからのユークリッド距離を真値と した. 真値は BOSCH 社のレーザレンジファインダで計測した.赤枠で囲んだ中の距離値が得られた画素に対し て,真値に対する誤差の絶対値の平均と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 0.15 m 移動させたときの 2 フレームの画像を用いた.なお,屋内環境では 3·3 で述べた路面平面推定が できないため,既知の移動距離を用いた.2 眼ステレオにおける,テンプレートサイズは 7 × 7 pixel,視差探索範 囲は 48 pixel とした.また,2 眼ステレオでは 2·4 節に基づく誤マッチング除去を行った.誤マッチング手法のし きい値は texture filter は 10, peak filter は 5%, minimum filter は 5,000, repetition filter は 50% とした.なお,リ ファレンスを用いた探索範囲限定では箇所によって探索範囲が狭いことより texture filter のみ用いた.また、4·2·2 項の説明に基づく探索範囲の限定を行い,k = 5 pixel とした.擬似バイラテラルフィルタでは全ての誤マッチング 除去を行った.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 2 の通りとした. なお,Condition 1 はリファレンスの視差マップをつくる際のパラメータ,Condition 2 は擬似バイラテラルフィル タを適用する際のパラメータである.

4.2.1 項で作成されたリファレンスの視差マップを図 11(c) に,対応点探索範囲の限定における距離画像の比較 を図 12 に示す.また,2 眼ステレオによる密な視差画像を図 11(a) に,モーションステレオによる特徴点ごとの視 差を図 11(b) 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 13 に示す.定量的評価として,誤差の 平均を表 3,4 に,距離値が取れた画素数に対する誤差の分布数の割合を表 5,6 に示す.距離画像において,光 軸方向距離が 1 m の本棚を見ているので,中心付近に青色の点があるのは明らかな誤マッチングを意味する.図 12 より,画像中心付近の誤計測している点が無くなっていることから,探索範囲を狭めたことによる誤マッチン グの減少が確認できる.また,表5 で 0.5 ≤ error の割合が大幅に減少していることからも誤マッチングに効果が あることが確認できる.しかし,それ以外の割合に大きな変化は無いことから距離精度を改善できているとは言 い難い.次に,図 13 より,擬似バイラテラルフィルタに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.このことより,特徴ベースが誤マッチングしづらいというメリット が活かされていることが分かる.表6 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 ≤ error < 0.1)

Parameter	Condition 1	Condition 2
Distance threshold $d_{\text{th}}$ [pixel]	30	20
Standard deviation $\sigma_1$ [pixel]	15	10
Standard deviation $\sigma_2$ [pixel]	/	10

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



Fig. 10 Experimental condition: a indoor environment.

Table 3Errors (restricting search range).			
Experimental condition	Average error [m]	Standard deviation [m]	
w/o restriction	0.52	5.01	
w/ restriction	-0.02	0.15	

Table 4Errors (bilateral-like filter).			
Experimental condition	Average error [m]	Standard deviation [m]	
w/o bilateral-like filter	0.33	4.30	
w/ bilateral-like filter	0.02	0.09	

Table 5 Rado of error range (restricting search range).			
Error range [m]	w/o restriction [%]	w/ restriction [%]	
$0 \leq \text{error} < 0.05$	23.11	27.11	
$0.05 \leq error < 0.1$	43.30	45.09	
$0.1 \leq \text{error} < 0.2$	14.99	17.53	
$0.2 \leq error < 0.5$	8.18	8.84	
$0.5 \leq error$	10.41	1.42	

 Table 5
 Ratio of error range (restricting search range).

Table 6	Ratio of error range	(bilateral-like filter).
---------	----------------------	--------------------------

- Tuble of Rule of error runge (bruterur inter		
Error range [m]	w/o filter [%]	w/ filter [%]
$0 \leq \text{error} < 0.05$	25.76	42.59
$0.05 \leq error < 0.1$	48.22	33.30
$0.1 \leq error < 0.2$	15.35	18.77
$0.2 \leq error < 0.5$	4.77	3.56
$0.5 \leq error$	5.91	0.02

が上昇している一方, 誤差の大きい点の割合 (0.5 ≤ error) が減少しているので明らかな誤マッチングを除去できて いることが分かる.以上より,2眼ステレオとモーションステレオの融合において, 誤マッチングの除去では2つ の提案手法の間で大きな差は見られなかったが, モーションステレオで得た結果をリファレンスとするよりも重 み付き平均化を行った方がモーションステレオの結果が距離精度に寄与されていることが分かる.

なお、本実験における処理時間は 4·2·1 項の手法が 146533 ms, 4·3 節の手法が 48540 ms であった.提案手法は、 1 章で挙げた ELAS (Geiger et al., 2011) やトリラテラルフィルタ (大石他, 2011) と同様にマッチングの高精度化 は達成したが、ELAS のようなリアルタイム処理は実現できなかった.このような膨大な時間がかかっているの は、重み付き平均の際、全テストデータと計算を行っているためだと考えられる.近傍点のみで効率良く計算す る手法として、kdtree 法が挙げられる.kdtree 法を 4·2·1 項の手法に適用した結果、処理時間は 5674 ms となった. したがって、4·3 節の手法も kdtree 法による高速化が可能であると考えられる.また、今後は上記の手法に加えて GPU の並列演算による高速化も行う予定である.

### 5·3 屋外実験

距離精度の評価実験を行った.屋内実験では近距離のみの評価であったが、本実験では近距離から遠距離まで 評価を行った.実験環境と計測箇所を色別で表記した画像を図14に示す.計測距離は1,3,5mとし、計測対象 は白黒の紙のエッジ部分とした.計測対象を図14に示す5か所各々に映るように、左右に動かして計測を行った. 真値はBOSCH社のレーザレンジファインダで計測した.距離計測結果は、計測箇所近傍で取得した25点の平均 と標準偏差で評価した.モーションステレオのスケールは3.3節で述べた路面平面推定で求めた.また、重み付き 平均における各パラメータは表7の通りとした.なお、Condition1はリファレンスの視差マップをつくる際のパ ラメータ、Condition2は擬似バイラテラルフィルタを適用する際のパラメータである.その他の条件は屋内実験



Fig. 11 Comparison of disparity maps based on: (a) binocular stereo, (b) motion stereo and (c) reference. Color represents disparity values from 0 pixel (blue) to 24 pixel (red).



Fig. 12 Comparison of range images based on: (a) without restricting corresponding points search range and (b) with restricting corresponding points search range. Color represents distance values from 0 m (red) to 10 m and above (blue).







(b)

Fig. 13 Comparison of range images based on: (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).

と全く同じである.

図 15 と 16 に画像中心の計測距離 1 m における距離画像を示す.図 17~22 に計測距離の誤差と標準偏差を載せる.なお,誤差と標準偏差の図は棒グラフの色が図 14(b)の計測箇所に対応している.

 Table 7
 Parameters for each experimental condition: Condition 1 is restricting corresponding points search range and Condition 2 is a bilateral-like filter.

Parameter	Condition 1	Condition 2
Distance threshold $d_{\text{th}}$ [pixel]	30	20
Standard deviation $\sigma_1$ [pixel]	15	10
Standard deviation $\sigma_2$ [pixel]	/	5



Fig. 14 Experimental conditions: (a) a outdoor environment and (b) measurement points.

図 15 より,視差探索範囲の限定により遠方のビル群における誤計測点の減少が確認できる.図 17~19 より,視差探索範囲の限定による距離精度の改善は見られなかった.また,擬似バイラテラルフィルタでも図 16 より遠方のビル群における誤計測点の減少が確認できる.加えて,図 20~22 より近距離では距離精度の改善が見られなかったが,遠距離では画像端で最大 20%強あった誤差を 10%未満に抑えられている.これは2眼ステレオに比べて3倍近くあるモーションステレオの基線長が寄与していると考えている.また,距離精度の向上より,路面平面推定によるスケール合わせも高い精度で行われているといえる.一方,画像中心の距離精度は改善しなかった.これは,モーションステレオの基線長が光軸方向であり,画像中心付近の計測精度が落ちるという特性によるものと考えている.したがって,4.1節で述べた計測位置による不確かさを考慮した融合が今後の課題といえる.

# 6. 結 言

本論文では、2種類のステレオ計測結果を融合した距離画像計測を実現した.2眼ステレオとモーションステレ オの融合を実現する手法として、モーションステレオの視差をリファレンスとした視差探索範囲の限定と、空間方 向と視差方向に対してガウス分布に従う重み付き平均化を行う擬似バイラテラルフィルタの2つを提案した.視 差探索範囲の限定により、計測密度の高さを維持したまま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、計測密度の高さを維持したまま遠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、画像の位置による不確かさを考慮した融合手法の構築ならびに、モーションステレオに用いる特徴点 の誤マッチング除去と処理時間の短縮によるオンライン化を行う予定である.



Fig. 15 Comparison of range images based on: (a) without restricting corresponding points search range and (b) with restricting corresponding points search range. Color represents distance values from 0 m (red) to 10 m and above (blue).



(a)

Comparison of range images based on: (a) without bilateral-like filter and (b) with bilateral-like filter. Fig. 16 Color represents distance values from 0 m (red) to 10 m and above (blue).



Fig. 17 Error and standard deviation of distance 1 m: (a) without restriction and (b) with restriction.



Fig. 18 Error and standard deviation of distance 3 m: (a) without restriction and (b) with restriction.



Fig. 19 Error and standard deviation of distance 5 m: (a) without restriction and (b) with restriction.







Fig. 21 Error and standard deviation of distance 3 m: (a) without bilateral-like filter and (b) with bilateral-like filter.



Fig. 22 Error and standard deviation of distance 5 m: (a) without bilateral-like filter and (b) with bilateral-like filter.

文 献

- 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.
- Alcantarilla, P. F., Nuevo, J. and Bartoli, A., Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces, in Proceedings of British Machine Vision Conference (2013).
- Furgale, P. et al., Toward automated driving in cities using close-tomarket sensors: An overview of the V-Charge Project, in Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (2013), pp. 809-816.
- Gehrig, S. K., Large-field-of-view stereo for automotive applications, in Proceedings of Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical cameras (2005).
- Geiger, A., Roser, M. and Urtasun, R., Efficient large-scale stereo matching, in Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer (2011).
- 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システ ムによる 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.
- Hane, C., Heng, L., Lee, G. H., Sizov, A. and Pellefeys, 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.
- 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 (2018), IS3-09.
- 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.
- Kim, D., Choi, J., Yoo, H., Yang, U. and Sohn, K., Rear obstacle detection system with fisheye stereo camera using HCT, Expert Systems With Applications, Vol. 42 (2015), pp. 6295-6305.
- Krombach, N., Droeschel, D. and Behnke, S., Evaluation of stereo algorithms for obstacle detection with fisheye lenses, in Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (2015), pp. 33-40.
- Moreau, J., Ambellouis, S. and Ruichek, Y., Equisolid fisheye stereovision calibration and point cloud computation, in Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (2013), pp. 167-172.
- Ohashi, A., Tanaka, Y., Masuyama, G., Umeda, K., Fukuda, D., Ogata, T., Narita, T., Kaneko, S., Uchida, Y. and Irie K., Fisheye stereo camera using equirectangular images, in Proceedings of the 2016 11th France-Japan congress on Mechatronics 9th Europe-Asia congress on Mechatronics 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (2016), pp. 284-289.
- Ohashi, A., Yamano, F., Masuyama, G., Umeda, K., Fukuda, D., Irie, K., Kaneko, S., Murayama, J. and Uchida, Y., Stereo rectification for equirectangular images, in Proceedings of 2017 IEEE/SICE International Symposium on

System Integration (2017).

- 大石修士, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉, Trilateral filter と Belief Propagation を用いた距離画像の平滑化及び欠損修 復, 第 16 回ロボティクスシンポジア講演予稿集 (2011), pp.1-7.
- Perng, J. W., Liu, P. Y., Zhong, K. Q. and Hsu, Y. W., Front object recognition system for vehicles based on sensor fusion using stereo vision and laser range finder, in Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (2017), pp. 261-262.
- Sasaki, N., Iijima, N. and Uchiyama, D., Development of ranging method for inter-vehicle distance using visible light communication and image processing, in Proceedings of 2015 15th International Conference on Control Automation and Systems (2015), pp. 666-670.
- Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Sliegwart, R., A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras, in Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2006), pp. 5695-5701.
- Shimizu, M. and Okutomi, M., Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching, International Journal of Computer Vision, Vol.63, No.3 (2005), pp. 207-224.
- Tomasi, C. and Manduchi, R., Bilateral filtering for gray and color images, in Proceedings of 1998 IEEE 6th International Conference on Computer Vision (1998), pp. 839-846.
- 山口晃一郎,加藤武男,二宮芳樹,車載単眼カメラによる車両前方の障害物検出,情報処理学会研究報告,2005-CVIM-151(2005), pp. 69-76.
- Yamano, F., Iida, H., Umeda, K., Ohashi, A., Fukuda, D., Kaneko, S., Murayama, J. and Uchida, Y., Improving the accuracy of a fisheye stereo camera with a disparity offset map, in Proceedings of 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics (2018), pp. 88-91.

#### References

- 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.
- Alcantarilla, P. F., Nuevo, J. and Bartoli, A., Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces, in Proceedings of British Machine Vision Conference (2013).
- Furgale, P. et al., Toward automated driving in cities using close-tomarket sensors: An overview of the V-Charge Project, in Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (2013), pp. 809-816.
- Gehrig, S. K., Large-field-of-view stereo for automotive applications, in Proceedings of Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical cameras (2005).
- Geiger, A., Roser, M. and Urtasun, R., Efficient large-scale stereo matching, in Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer (2011).
- Goto, S., Kawanishi, R., Yamashita, A. and Kaneko, T., 3D measurement by omnidirectional stereo camera system using binocular stereo together with motion stereo, in Proceedings of ROBOMECH2010 (2010), 1A2-E29 (in Japanese).
- Hane, C., Heng, L., Lee, G. H., Sizov, A. and Pellefeys, 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.
- Iida, H., Yamano, F., Umeda, K., Ohashi, A., Fukuda, D., Kaneko, S., Murayama, J. and Uchida, Y., Range images measurement using multiple stereo image pairs of a fisheye stereo camera, in Proceedings of The 24th Symposium on Sensing via Image Information (2018), IS3-09 (in Japanese).
- 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.
- Kim, D., Choi, J., Yoo, H., Yang, U. and Sohn, K., Rear obstacle detection system with fisheye stereo camera using HCT, Expert Systems With Applications, Vol. 42 (2015), pp. 6295-6305.
- Krombach, N., Droeschel, D. and Behnke, S., Evaluation of stereo algorithms for obstacle detection with fisheye lenses, in Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (2015), pp. 33-40.

- Moreau, J., Ambellouis, S. and Ruichek, Y., Equisolid fisheye stereovision calibration and point cloud computation, in Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (2013), pp. 167-172.
- Ohashi, A., Tanaka, Y., Masuyama, G., Umeda, K., Fukuda, D., Ogata, T., Narita, T., Kaneko, S., Uchida, Y. and Irie K., Fisheye stereo camera using equirectangular images, in Proceedings of the 2016 11th France-Japan congress on Mechatronics 9th Europe-Asia congress on Mechatronics 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (2016), pp. 284-289.
- Ohashi, A., Yamano, F., Masuyama, G., Umeda, K., Fukuda, D., Irie, K., Kaneko, S., Murayama, J. and Uchida, Y., Stereo rectification for equirectangular images, in Proceedings of 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2017).
- Oishi, S., Kurazume, R., Iwashita, Y. and Hasegawa, T., Smoothing and inpainting range image using trilateral filter and belief propagation, in Proceedings of The 16th Robotics Symposia (2011), pp.1-7 (in Japanese).
- Perng, J. W., Liu, P. Y., Zhong, K. Q. and Hsu, Y. W., Front object recognition system for vehicles based on sensor fusion using stereo vision and laser range finder, in Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (2017), pp. 261-262.
- Sasaki, N., Iijima, N. and Uchiyama, D., Development of ranging method for inter-vehicle distance using visible light communication and image processing, in Proceedings of 2015 15th International Conference on Control Automation and Systems (2015), pp. 666-670.
- Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Sliegwart, R., A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras, in Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2006), pp. 5695-5701.
- Shimizu, M. and Okutomi, M., Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching, International Journal of Computer Vision, Vol.63, No.3 (2005), pp. 207-224.
- Tomasi, C. and Manduchi, R., Bilateral filtering for gray and color images, in Proceedings of 1998 IEEE 6th International Conference on Computer Vision (1998), pp. 839-846.
- Yamaguchi, K., Kato, T., Ninomiya, Y., Obstacle detection in road scene using monocular camera, IPSJ SIG Technical Reports, 2005-CVIM-151(2005), pp. 69-76 (in Japanese).
- Yamano, F., Iida, H., Umeda, K., Ohashi, A., Fukuda, D., Kaneko, S., Murayama, J. and Uchida, Y., Improving the accuracy of a fisheye stereo camera with a disparity offset map, in Proceedings of 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics (2018), pp. 88-91.