

## 魚眼ステレオカメラによる Structure from Motion のための移動物体検出

○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 \*

○ Hiroataka IIDA †, Yonghoon JI ‡, Kazunori UMEDA ‡, Akira OHASHI \*,  
Daisuke FUKUDA \*, Shuzo KANEKO \* and Junya MURAYAMA \*

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

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

\*: クラリオン (株), {akira.ohashi, daisuke.fukuda, shuzo.kaneko, junya.murayama}  
@faurecia.com

〈要約〉本稿では、時系列画像を用いた移動物体に対応可能な広範囲 3 次元復元手法について述べる。特徴ベースの Structure from Motion (SfM) はカメラを用いた 3 次元復元手法として広く利用されているが、移動物体の計測ができない。一方、ステレオカメラによる 2 眼ステレオは同一フレームの画像を用いた 3 次元復元を行うため移動物体も計測が可能である。本論文では上記 2 種類の計測を行い、移動物体上では 2 眼ステレオでの計測点だけを上手く残すことで移動物体にも対応可能な SfM を提案する。

〈キーワード〉魚眼ステレオカメラ, SfM, 2 眼ステレオ, 再投影誤差

## 1 序論

近年、交通事故を削減することを目的とした運転支援技術の実用化が加速している。運転支援技術のための環境計測には主に距離センサが用いられるが、多くのシステムが複数のセンサを用いて各々のセンサの弱点を補いあっている。本研究では、運転支援技術に応用できる距離センサとして魚眼ステレオカメラに注目する。魚眼ステレオカメラは、1 台で広範囲かつ高密度な計測が可能であるので、従来のシステムよりも低コストになることが期待できる。大橋らは、魚眼画像を正距円筒画像に変換して利用する 3 次元計測手法を提案している [1]。魚眼画像が持つ歪を低減し、対応点探索を単純化しているが、中～遠距離の計測精度に課題を残している。これに対し、飯田らは時系列画像も導入することで魚眼ステレオカメラの高精度化を行なっている [2]。[2] では、時系列画像を用いた 3 次元復元と同一フレームを用いた 3 次元復元が混在しているが、移動物体に関しては何も考慮しておらず、誤計測が生じうる。移動物体の検出は、運転支援技術の実現のためにも重要である。実際に車載カメラから移動物体を検出する手法が提案されている [3, 4]。戸田らは、移動

するステレオカメラから得られる 3 次元座標を用いた移動物体検出手法を提案している [5]。伊藤らは、カメラとレーザレンジファインダを組み合わせた動的物体計測手法を提案している [6] が、誤マッチングが多く、高精度な 3 次元環境計測には至っていない。本論文では、再投影誤差を用いた簡便な誤マッチング除去を行うことで移動物体にも対応できる手法を提案する。

## 2 提案手法

### 2.1 特徴点検出

本研究では、魚眼画像を変換した正距円筒画像から AKAZE を用いて特徴点を検出する [7]。AKAZE は画像のブラー、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、移動するカメラで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を用いて特徴検出器の極値を探索するため、魚眼画像より歪が小さい正距円筒画像を用いることが適している。

### 2.2 3 種類のマッチング

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、図 1 に示すように、2 フレームのステレオ画像の計

4枚の画像のうち、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。このようなマッチングを行うことで、時系列画像間の対応点 (Pattern 1と2) と同一フレーム間の対応点 (Pattern 3) が混在することになる。ゆえに、SfM(モーションステレオ)と2眼ステレオの2種類の計測を同時に行うことになる。

### 2.3 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。3種類のマッチングのうち Pattern 3 はステレオカメラの相対的位置・姿勢を既知とすることで  $R$  と  $t$  を得る。よって、運動パラメータ推定は Pattern 1 と 2 の点群に対して行うこととする。まず、2.2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。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。なお、2.1節で得られる特徴点は正距円筒座標  $(\lambda, \phi)$  であるため、

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

により透視投影座標  $(x, y, z)$  へ変換してから基本行列の計算を行う。

### 2.4 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列  $P$  を用いて次式で表せる。

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

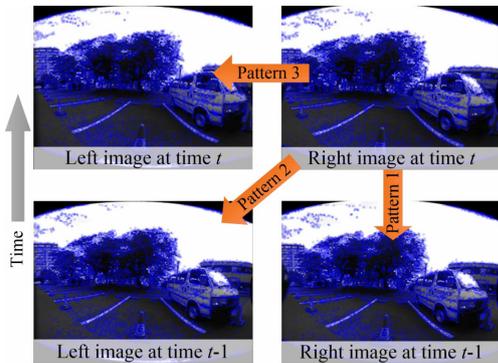


図1 3種類のマッチング

ただし、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

このときの  $\sim$  は同次座標として等しいことを表す。式 (3) 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。

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

ただし、

$$\begin{bmatrix} p_{31}x - p_{11} & p_{32}x - p_{12} & p_{33}x - p_{13} \\ p_{31}x - p_{21} & p_{32}x - p_{22} & p_{33}x - p_{23} \\ p'_{31}x' - p'_{11} & p'_{32}x' - p'_{12} & p'_{33}x' - p'_{13} \\ p'_{31}x' - p'_{21} & p'_{32}x' - p'_{22} & p'_{33}x' - p'_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14} - p_{34}x \\ p_{24} - p_{34}y \\ p'_{14} - p'_{34}x' \\ p'_{24} - p'_{34}y' \end{bmatrix} \quad (5)$$

$(x, y)$  と  $(x', y')$  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。 $p$  と  $p'$  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  $\hat{\mathbf{X}} = (\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$  は以下の最小2乗法によって求められる。

$$\hat{\mathbf{X}} = B^+\mathbf{b} \quad (6)$$

$$B^+ = (B^T B)^{-1} B^T \quad (7)$$

ただし、 $B^+$  は擬似逆行列である。2.2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。

### 2.5 再投影誤差による誤マッチング除去

式 (2) より、最小2乗解  $(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$  に透視投影行列  $P$  を掛けることで、透視投影座標  $(\hat{x}, \hat{y})$  へと再投影することができる。再投影誤差  $D$  は次式で計算される。

$$D = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \quad (8)$$

この  $D$  がしきい値以下の点群だけ残す。この処理により、移動物体が存在する場合でもその移動物体上は Pattern 1 と 2 (SfM) の点群が除去され、Pattern 3 (2 眼ステレオ) の点群のみが残ることになる。このように同一フレームの画像を用いた 3 次元復元結果のみが残るため、移動物体の計測も可能となる。

### 3 実験

#### 3.1 単数移動体検出実験

実験で用いた魚眼ステレオカメラの外観を図 2 に示す。カメラの内部パラメータは MATLAB の OcamCalib Toolbox を利用して推定した [8]。実験環境を図 3(a) に示す。移動物体には服を着せた身長 80 cm の人形を利用した。図 3(b) に示すように、2 フレーム間において、カメラは  $Z$  軸方向に 15 cm、人形は  $X$  軸方向に -15 cm 移動させた。人形までの距離が 1.5 m と 2.0 m の 2 パターンを実施した。この環境で 3 次元復元まで行った後、手動で人形が映っている領域を選択し、その領域における Pattern 1~3 各々の特徴点数の誤マッチング除去前後での変化を調べた。

誤マッチング除去前後のマッチングの種類ごとのオプティカルフローを図 4, 5 に、誤マッチング除去前後の特徴点数の変化を表 1, 2 に示す。図 4, 5 から、誤マッチング除去により Pattern 1 と 2 のフローが大幅に減少していることが分かる。また、表 1, 2 から提



図 2 魚眼ステレオカメラ

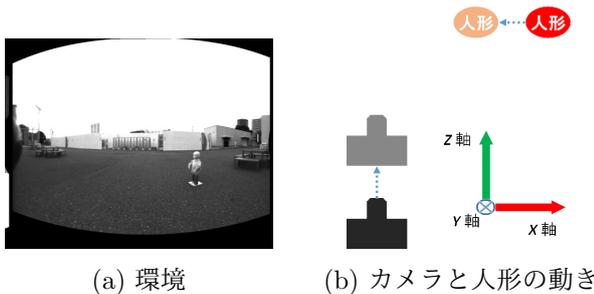


図 3 実験環境

表 1 特徴点数の変化 (距離 1.5 m)

	誤マッチング除去前	誤マッチング除去後
Pattern1	160	25
Pattern2	105	5
Pattern3	329	322

表 2 特徴点数の変化 (距離 2.0 m)

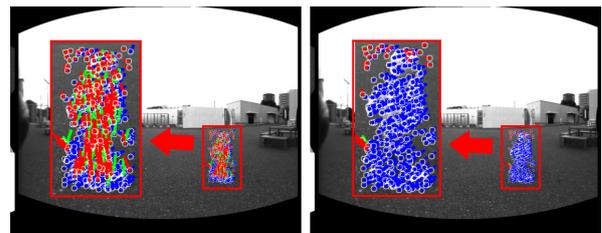
	誤マッチング除去前	誤マッチング除去後
Pattern1	92	0
Pattern2	72	0
Pattern3	197	196

案手法により移動物体上において時系列画像を用いた Pattern 1 と 2 の点は除去され、同一フレームを用いた Pattern 3 の点だけ残すことが可能であった。

#### 3.2 複数移動体検出実験

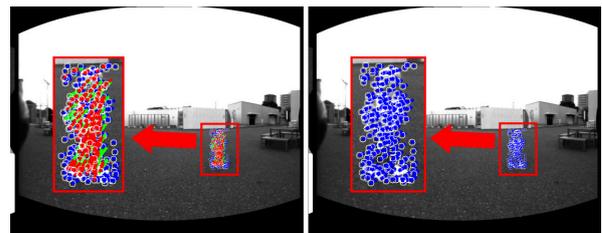
実験環境を図 6 に示す。図 7 に示すように、2 フレーム間において、カメラは  $Z$  軸方向に約 15 cm、4 人の人物は  $X$  軸方向に移動した。最も近い人物までの距離が 1.7 m, 0.8 m, 0.4 m の 3 パターンを実施した。この環境で 3 次元復元まで行った後、人物上のオプティカルフローの誤マッチング除去前後での変化を調べた。

実験結果のオプティカルフローを図 8~10 に示す。これらの図から分かるように、人物上において時系列画像を用いた Pattern 1 と 2 の点はほぼ除去され、同一フレームを用いた Pattern 3 の点だけ残すことができている。この実験では、複数の移動物体が存在し、そ



(a) 誤マッチング除去前 (b) 誤マッチング除去後

図 4 距離 1.5 m のオプティカルフロー (Pattern 1 : 赤, Pattern 2 : 緑, Pattern 3 : 青)



(a) 誤マッチング除去前 (b) 誤マッチング除去後

図 5 距離 2.0 m のオプティカルフロー (Pattern 1 : 赤, Pattern 2 : 緑, Pattern 3 : 青)



(a) 距離 1.7 m



(b) 距離 0.8 m



(c) 距離 0.4 m

図 6 実験環境

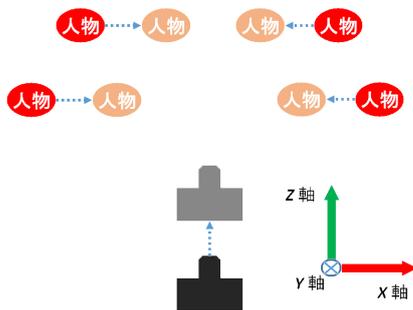


図 7 カメラと人物の動き

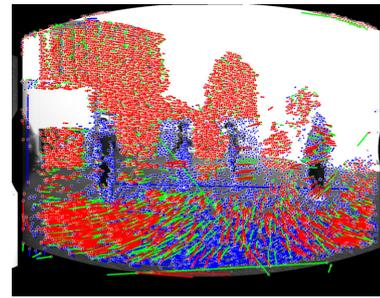
れらが大きく映る厳しい環境で実施したが、問題なく誤マッチング除去が機能した。これは、魚眼ステレオカメラの画角の広さと RANSAC によるロバストな運動パラメータ推定が寄与していると考えている。

#### 4 結論

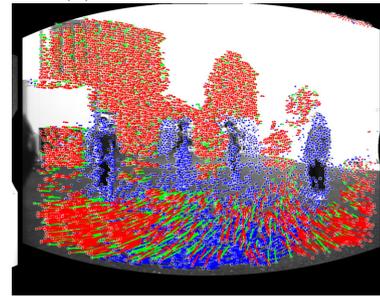
本論文では、SfM とステレオカメラによる 2 眼ステレオを組み合わせた 3 次元復元において、再投影誤差による簡便な誤マッチング除去により静止物体と移動物体を計測する点群を使い分ける手法を実装した。また、多くの移動物体が存在し、それらが大きく映る環境下でも問題なく点群の使い分けが可能であることを実験により示した。以上により、魚眼ステレオカメラを用いて静止物体、移動物体ともに 3 次元環境計測ができるシステムの構築が可能であることを示した。

#### 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, pp.1095–1100 (2017).



(a) 誤マッチング除去前



(b) 誤マッチング除去後

図 8 距離 1.7 m のオプティカルフロー (Pattern 1 : 赤, Pattern 2 : 緑, Pattern 3 : 青)

[2] 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).

[3] Z. Hu and U. Uchimura, “Tracking cycle: a new concept for simultaneous tracking of multiple moving objects in a typical traffic scene,” in *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000.

[4] D. Mochizuki, Y. Yano, T. Hashiyama, and S. Okuma, “Pedestrian detection with a vehicle camera using fast template matching based on back-

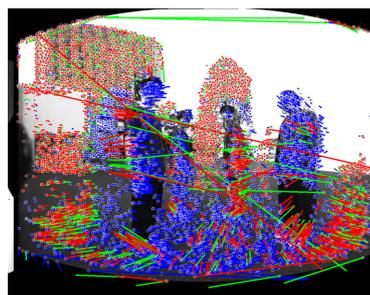
ground elimination and active search,” *Electronics and Communications in Japan (Part : Electronics)*, pp. 115-126, 2007.

[5] T. Toda, G. Masuyama, and K. Umeda, “Moving Object Detection Using a Stereo Camera Mounted on a Moving Platform,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 10, No. 5, pp. 344-349, 2017.

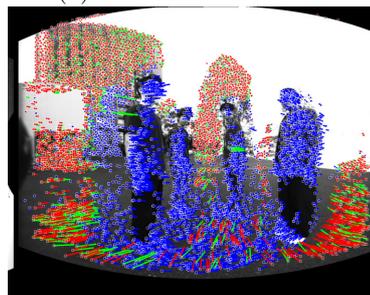
[6] 伊藤駿, 吉田武史, 鷺見和彦: “カメラと2次元レーザセンサを搭載した手持ち装置による動的物体の3次元復元”, 情報処理学会第78回全国大会講演論文集, pp.261-262 (2016).

[7] 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.

[8] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Sliedright, “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.

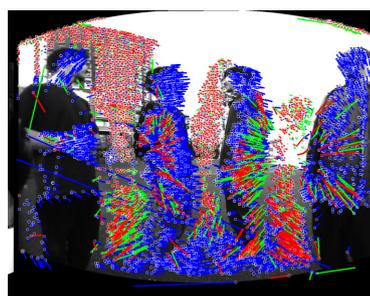


(a) 誤マッチング除去前

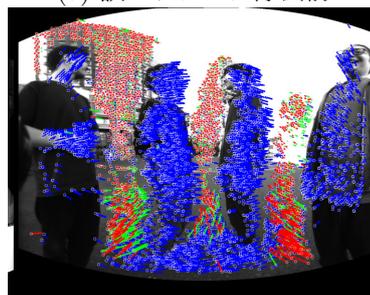


(b) 誤マッチング除去後

図 9 距離 0.8 m のオプティカルフロー (Pattern 1 : 赤, Pattern 2 : 緑, Pattern 3 : 青)



(a) 誤マッチング除去前



(b) 誤マッチング除去後

図 10 距離 0.4 m のオプティカルフロー (Pattern 1 : 赤, Pattern 2 : 緑, Pattern 3 : 青)