

# 擬似バイラテラルフィルタの改善による魚眼ステレオカメラの精度向上

- 新井健斗†, 佐久田朝優‡, 大橋明★, 福田大輔★, 梅田和昇†
- Kento ARAI†, Tomoyuu SAKUDA‡, Akira OHASHI★, Daisuke FUKUDA★,  
and Kazunori UMEDA†

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

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

★: クラリオン (株), {akira.ohashi, daisuke.fukuda}@faurecia.com

<要約> 本論文では, 魚眼ステレオカメラを用いた広範囲 3 次元復元手法を対象とする. 2 眼ステレオでの 3 次元復元結果及び, 特徴ベースの Structure from Motion (SfM) による 3 次元復元結果を融合することで高精度な計測を行う. 2 つの 3 次元復元結果を融合する手法として用いる擬似バイラテラルフィルタを改善することで精度の向上を実現させる. 改善内容としては, 重みの変更と近距離での計測手法の切り替えを行う.

<キーワード> 魚眼ステレオカメラ, SfM, 2 眼ステレオ, 3 次元復元

## 1. 序論

近年, 自動運転に関する研究が盛んに行われ, 中でも運転支援技術は実用化が進んでいる. 運転支援技術には周囲の環境情報を取得するために主に距離センサが用いられる. 本研究では, 運転支援技術への応用を目的とした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視野角が約 180°と広角で計測密度が高いという利点があるが, 画像周辺部に歪が発生するというデメリットがある. 大橋らは魚眼画像から正距円筒画像に変換することで歪の影響を抑えた 3 次元計測手法を提案している [1]. 魚眼画像の歪の低減に成功したが, 中, 遠距離で, 誤差率が 10%を上回り距離計測精度が不十分であった. これに対し飯田らは, 時系列画像を導入することでより高精度な 3 次元計測手法を提案している [2]. これにより魚眼ステレオカメラによる距離計測精度が向上したが, 近距離では誤差率が 10%を超えていた. そこで本論文では, [2]で提案された手法である擬似バイラテラルフィルタについて精度向上のためのいくつかの改善案を提案する. なお, 近, 中, 遠距離の具体的な値については, それぞれ 2m 以下, 2m~7m, 7m 以上を想定する.

## 2. 擬似バイラテラルフィルタを用いた距離画像計測

2 眼ステレオによる視差と Structure from Motion (SfM)による視差を擬似バイラテラルフィルタを用いて融合することで, 高精度な距離画像計測を実現する (図 1 参照). これは, 重み付けを注目画素とその周辺の特徴点までの距離, 注目画素の視差とその周辺の特徴点の視差の差の 2 つで行う. この重み付けがバイラテラルフィルタ [3]に似ていることから擬似バイラテラルフィルタと呼ぶ. 本手法では, 図 2 に示すように 2 つの時間に得られた 2 眼の画像に対して 3 種類のパターンでマッチングを行い, SfM を実行する. このとき, パターン毎に基線長の向きが異なる. 基線長の向きによって距離精度が大きく変わるため, 上記の重みに加え SfM のパターン毎に基線長の向きを考慮した重み付けを行う.

## 3. 提案手法

### 3.1 重みの変更

前章で記述した通り, 擬似バイラテラルフィルタでは複数の重み付けを採用している. 従来は SfM の各マッチングによる重み付けはガウス分布に従った

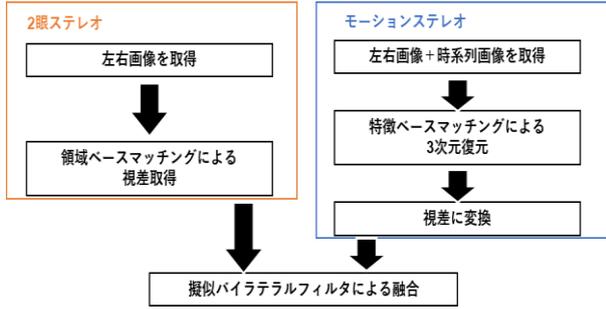


図1 2つの計測手法の融合

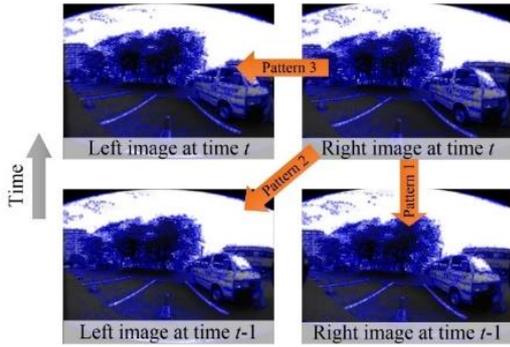


図2 SfMのマッチングパターン

重みを採用していたが、これは理論的な根拠はなかった。そこで、理論的に最適になるように、距離の不確かさを利用した重みに変更する。重みはSfMのパターン毎に与えるため3つ立式される。ここでは、図2のPattern3について導出の過程を示す。図3にカメラと計測対象の位置関係を示す。 $D$ は右カメラから計測対象までのユークリッド距離、 $\lambda_l$ 、 $\lambda_r$ はそれぞれ左右カメラの方位角、 $\phi_r$ は右カメラの仰角、 $b$ は左右カメラ間の距離(基線長)を表している。なお、方位角、仰角共に画像中心が $0^\circ$ である。この時、正弦定理より式(1)が成り立つ。

$$\frac{b}{\sin\Delta\lambda} = \frac{D\cos\phi_r}{\sin(90^\circ - \lambda_l)} \quad (1)$$

ここで、計算の簡単化のために2つの条件を設ける。

- ① 仰角 $\phi$ は無視する
- ② 基線長 $b$ より距離 $D$ が十分大きいものとし、 $\Delta\lambda$ は微小とみなす

式(1)を整理すれば、

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

さらに②から $\Delta\lambda$ が微小なので、 $\sin\Delta\lambda \approx \Delta\lambda$ 、 $\cos(\Delta\lambda + \lambda) \approx \cos\lambda_r$ と近似できる。よって、

$$\frac{b}{\Delta\lambda} = \frac{D}{\cos\lambda_r} \quad (3)$$

$$D = \frac{b\cos\lambda_r}{\Delta\lambda} \quad (4)$$

となる。式(4)で、誤差の伝播則から距離 $D$ の不確かさ $\sigma_D$ が、

$$\sigma_D = \frac{D^2}{b\cos\lambda} \sigma_{\Delta\lambda} \quad (5)$$

と求まる。同様の手順でPattern1, Pattern2についても誤差の不確かさを求めることができ、各パターンにおける距離の不確かさが以下のように求まる。

Pattern1

$$\sigma_D = \frac{D^2}{b\sin\lambda} \sigma_{\Delta\lambda} \quad (6)$$

Pattern2

$$\sigma_D = \frac{D^2}{b\sin(\lambda + \alpha)} \sigma_{\Delta\lambda} \quad (7)$$

Pattern3

$$\sigma_D = \frac{D^2}{b\cos\lambda} \sigma_{\Delta\lambda} \quad (8)$$

$\sigma_{\Delta\lambda}$ は視差角の不確かさ、 $\alpha$ はPattern2における移動軸と基線長とのなす角を表している(図4参照)。

なお、図4は各パターンの基線長を表したものである。Pattern1の基線長(2フレーム間の移動量)は、車の時速を10 km/h、フレームレートを20fpsと仮定して0.15mとした。これら距離の不確かさから次式により重みを算出する。

$$w = \frac{1}{\sigma_D^2} \quad (9)$$

各パターンにおける重みを図5に示す。基線長 $b$ は図4の値を用い、距離 $D=1m$ 、視差角の不確かさ $\sigma_{\Delta\lambda}=0.052$ としている。図4で、Pattern3の基線長がPattern1, Pattern2に比べ小さいことで図5のPattern3の重みだけ値が小さくなる。

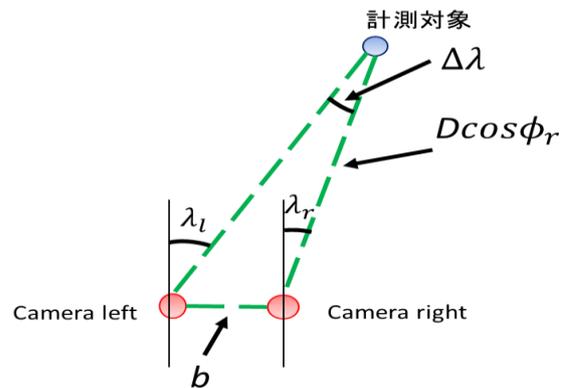


図3 カメラと計測対象の位置関係

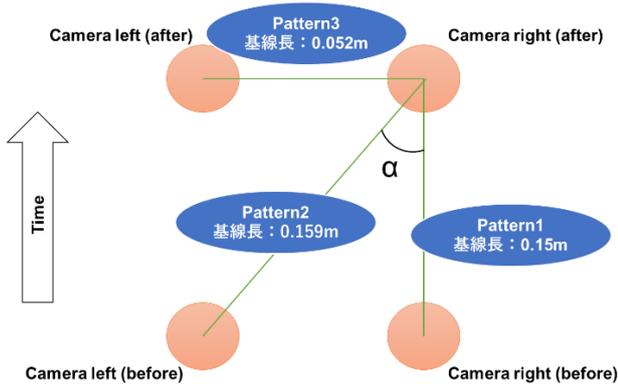
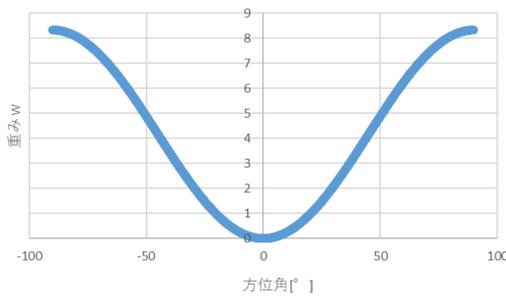
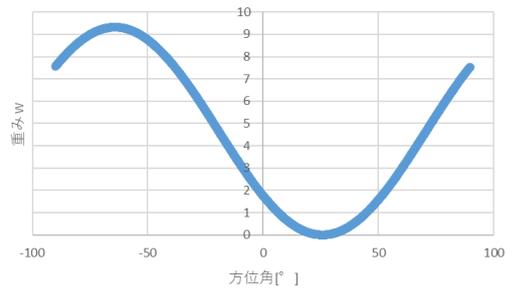


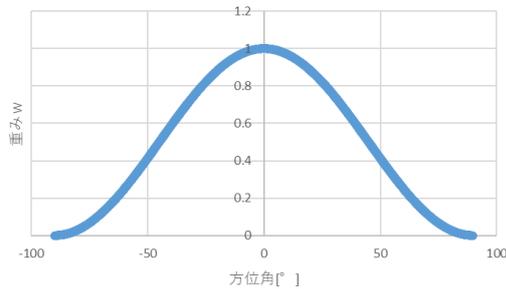
図4 各パターンの基線長



(a) Pattern1 の重み



(b) Pattern2 の重み



(c) Pattern3 の重み

図5 各パターンの重みの分布

### 3.2 近距離における手法の切り替え

擬似バイラテラルフィルタを用いた3次元復元は中距離での精度は良いものの近距離での精度は不十分である[2]. 一方で, 2眼ステレオによる3次元復元では近距離においては擬似バイラテラルフィルタ

を上回る精度となっている[1]. 原因としては2眼の基線長とSfMの基線長の違いが挙げられる. SfMの基線長は2眼の基線長に比べ約3倍である. ステレオ視は基線長が長い程距離計測精度は一般によくなるが, 近距離では基線長が大きすぎることでSfMにおける画像の見えが異なって誤マッチングが増えることで, 計測精度が低下していると考えられる. そこで本論文では, 擬似バイラテラルフィルタを用いて求まる距離がしきい値以下の場合には2眼ステレオのみを使った視差取得に手法を切り替えることで中距離以上の精度を保ちつつ近距離の精度を向上させる. 図6に手法切り替えの流れを示す.

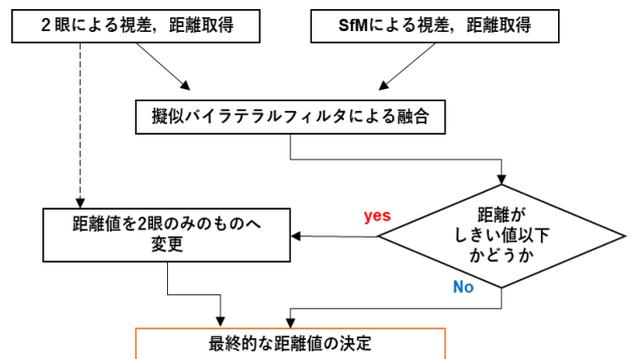


図6 手法切り替えの流れ

## 4. 実験

実験で使用する魚眼ステレオカメラの外観を図7に示す. 機種, 画角は以下の通りである.

- CMOSカメラ: Flea3 (FLIR)
- 魚眼レンズ: TV1634M (SPACE)
- 水平方向画角: 165°
- 垂直方向画角: 132°

また魚眼カメラの内部パラメータのキャリブレーションには, MATLABのOcamCalibToolboxを利用した[4].



図7 魚眼ステレオカメラの外観

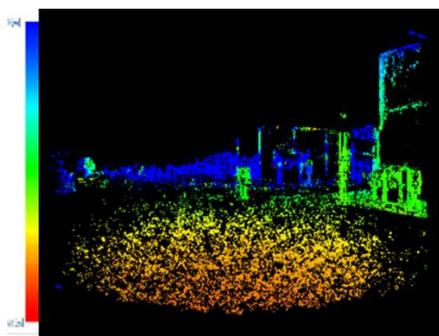
### 4.1 重み付けの変更に関する実験

3.1節で行った重みの変更の影響について調べた. 実験環境を図8に, 重み付け変更前後で得られた距

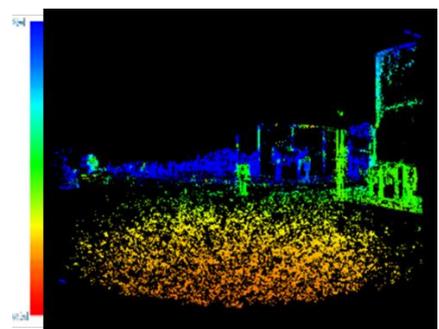
距離画像を図9に示す。距離画像は色が赤いほど近く、青いほど遠くを示している。距離精度評価の手順を示す。画像中の仰角を0°で一定とし方位角-60°、-30°、0°、30°、60°の5か所を計測位置としてその箇所にマーカを設置した(図8参照)。マーカまでの距離は3m、7mとした。マーカ内のエッジ上のランダムな一点を注目点とし、注目点とその上下1点ずつ計3点の計測を4回行い、計12点の誤差の平均、標準偏差で評価する。図10、図11が結果である。図9の2枚の画像に明確な違いは見られず、距離精度も大きく異なる箇所はない。このことから、重み付けの切り替えにより同等程度の計測精度になったと言える。図10、図11で、重み変更後は3m、7mともに方位角60°で誤差率が最大となっている。魚眼レンズの非等方性による影響を受けたと考えている。



図8 実験環境

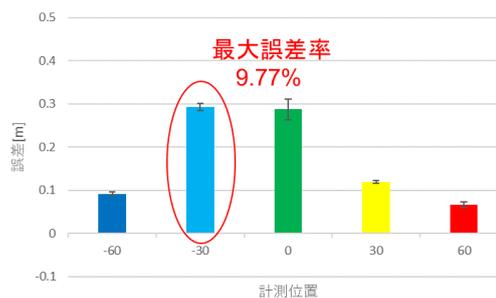


(a) 重み変更前



(b) 重み変更後

図9 復元された距離画像

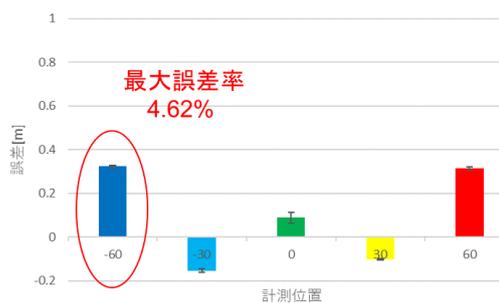


(a) 重み変更前

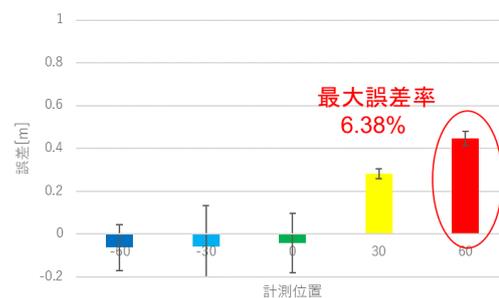


(b) 重み変更後

図10 距離3mにおける精度



(a) 重み変更前



(b) 重み変更後

図11 距離7mにおける精度

#### 4.2 手法の切り替えに関する実験

近距離における距離精度の評価を行う。評価方法は4.1節と同じである。ただし、マーカまでの距離は1m、2mとした。図12に距離1mの画像を示す。

なお、3.2節の手法を切り替えるしきい値は2mとした。図13、図14がその結果である。手法の切り替えがない場合、距離1mにおいて画像の端の方で急に精度が悪くなっていることが分かる。これは、擬似バイラテラルフィルタが各パターンに対して重み付けを行っているため、画像の端の方ではPattern1、Pattern2の寄与度が大きくなる(図5参照)。3.2節で言及した通り、近距離ではPattern1、Pattern2での基線長が計測対象までの距離に対し長すぎることからこのような誤差が発生したと考えられる。これに対し手法を切り替えた場合、精度が大幅に向上していることが分かる。また、距離2mでは、精度が同程度、またはやや良い結果となった。しきい値付近で精度が低下することはなかったと言える。



図12 実験環境 (マーカー距離 1m)

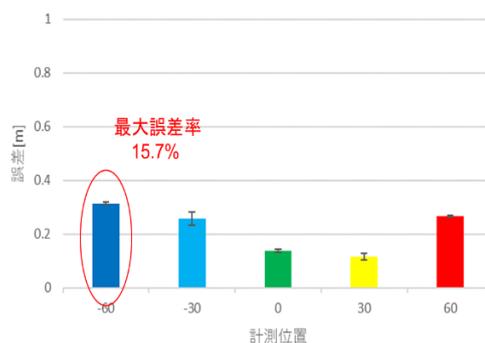


(a) 手法切り替えなし



(b) 手法切り替えあり

図13 距離 1m における精度



(a) 手法切り替えなし



(b) 手法切り替えあり

図14 距離 2m における精度

## 5. 結論

本論文では、擬似バイラテラルフィルタがより高性能になる改善を行った。重み付けを理論的に最適なものにし、また近距離での手法の切り替えによる魚眼ステレオカメラの精度向上を確認できた。今後の展望としては、SfMにおいて距離に応じて基線長の長さを適応的に変えることを検討する。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 19H04191 の助成を受けたものである。

## 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, pp.1095-1100 (2017).
- [2] 飯田浩貴, 佐久田朝優, 池勇勲, 梅田和昇, 大橋明, 福田大輔, 金子修造, 村山純哉, “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”, 精密工学会誌, Vol.86, No.12, pp.969-974 (2020).

- [3] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images," in Sixth International Conference on Computer Vision, pp.839–846(1998).
- [4] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart, "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).