論文

視差オフセットマップによる魚眼ステレオカメラの高精度化 *

山野 史登 ** 飯田 浩貴 *** 梅田 和昇 † 大橋　明 ††
福田 大輔 †† 金子 修造 †† 村山 純哉 †† 内田 吉孝 ††

Improvement on Accuracy of Fisheye Stereo Camera by Disparity Offset Map

Fumito YAMANO, Hirotaka IIDA, Kazunori UMEDA, Akira OHASHI,
Daisuke FUKUDA, Shuzo KANEKO, Junya MURAYAMA and Yoshitaka UCHIDA

This paper improves the accuracy of fisheye stereo camera by correcting images using a disparity offset map. A disparity offset map is a map of disparity errors that are calculated from the disparity of the feature points obtained from an object with known distance. By correcting the disparity errors and aligning the images, errors due to the insufficient calibration of the camera parameters, etc. are reduced. A disparity offset map is constructed and the accuracy of distance measurement of a fisheye stereo camera using the disparity offset map is evaluated by experiments.

Key words: stereo camera, fisheye camera, equirectangular image, calibration, disparity, offset map, range image

1. 序　　論

近年，クルマの運転支援のためのカメラや距離センサなどが多く使用されている．例としてステレオカメラ，LiDAR，ソナーなどがクルマに搭載されている．本論文では，魚眼ステレオカメラに着目する．魚眼カメラは 180 度前後の広い視野角を持ち，魚眼カメラを二つ用いた魚眼ステレオカメラを構築することによって広範囲で密な距離計測が可能となる．

魚眼ステレオカメラの従来研究としては以下のような研究がある．Abraham ら [1] 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．しかし，密な環境復元や計測ができていない． Moreau ら [2] は，等立体角投影モデルの魚眼ステレオカメラを用いた環境復元を達成した．しかしながら，この方法は大きな計算コストを必要とする．Hane ら [3] は，plane-sweeping 法を用いてリアルタイムの 3 次元計測を実現した．また，UAV[4] や車両 [5)~7)] などの実用的なプラットフォームに魚眼ステレオカメラを適用した例も存在する。これらの研究では，魚眼画像は通常，対応点探索を単純化するために透視投影画像に変換される．しかし，変換の際に画像の周辺領域が大きく引き伸ばされるため，周辺領域でステレオマッチングを行うことが困難となり，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．

そこで大橋ら [8)9)] はこれらの問題を解決するため，魚眼画像を方位角と仰角を横軸と縦軸においた直交座標系の画像に変換した正距円筒画像を用いた魚眼ステレオカメラを提案している．正距円筒画像により魚眼画像の歪みの低減，対応点探索の簡単化を行うことができる．しかしながら，距離計測精度が十分でないという課題がある．これは，外部パラメータ（2 台のカメラ間の相対位置姿勢）および各カメラの内部パラメータの誤差によると考えられる．これらの誤差が大きくなるのは，まずは，魚眼画像より小さいとは言え透視投影画像と比較すると正距円筒画像の歪みが大きいことやカメラの個体差が大きいことによる．また，構築した魚眼ステレオカメラの各魚眼カメラで，歪曲収差が方向によって異なる非等方性が観測されることも理由であると考えている．これに対し，本論文では，キャリブレーション手法やモデルの改善を行うのではなく，既知の距離にある対象の視差から画像の補正をする視差オフセットマップを提案する [10)]．視差オフセットマップとは既知の距離にある対象から得られた特徴点の視差から求められた視差誤差をもとに全画素を補正するマップである．この視差オフセットマップを用いることで内部パラメータと外部パラメータの誤差の修正をし，魚眼ステレオカメラの高精度化を行う．提案手法の有効性を実験で示す．

2. 魚眼ステレオカメラの概要

2.1 魚眼カメラモデル

魚眼レンズの射影方式には，等距離射影や立体角射影，等立体角射影などがある．しかし，製造過程に発生する誤差などにより実際の魚眼カメラは理想的な射影方式に厳密には従わない．そこで本論文では，Scaramuzza ら [11)] が提案している誤差を考慮したカメラモデルを用いて内部パラメータを算出を行い，魚眼カメラの歪みを補正する．

2.2 正距円筒画像

図 **1**(a)(b) に示す通り，魚眼画像の歪みを透視投影画像に変換することで除くと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，引き伸ばしを抑えつつ，歪みを低減させることでステレオマッチング

*　原稿受付　平成 30 年 5 月 4 日
　　掲載決定　平成 30 年 8 月 2 日
**　正 会 員　中央大学大学院 (現，(株) マツダ；
　　広島県安芸郡府中町新地 3-1)
***　中央大学大学院 (東京都文京区春日 1-13-27)
†　正 会 員　中央大学 (東京都文京区春日 1-13-27)
††　(株) クラリオン (埼玉県さいたま市中央区新都心 7-2)

を簡単化させる投影法として，本論文では図 1(c) の正距円筒画像を用いる．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，魚眼画像に対して無理なく変換でき，引き延ばしや歪みの少ない画像を作成することができる．魚眼画像を正距円筒画像に変換する概念図を**図 2** に示す．

2.3 計測値の 3 次元位置

対象物と魚眼ステレオカメラの距離はカメラからのユークリッド距離とする．本論文では，右カメラを基準とする．距離 D は基線長を b，左右カメラの方位角の視差を $\Delta\lambda$，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 とすると次式で計算できる．

$$D = \frac{b}{\sin\Delta\lambda}\frac{\cos\lambda_l}{\cos\phi_r} \tag{1}$$

3. 視差オフセットマップ

3.1 距離が既知の特徴点に対する視差誤差

既知の距離にある対象を撮像した正距円筒画像から特徴点を抽出し，それぞれの点の視差の誤差を求める．距離が既知なので理論的な視差が求められ，抽出した視差との誤差を求めることが可能である．視差は横方向（方位角方向），縦方向（仰角方向），それぞれに対して求める．対象物は既知の距離にある遠方のものとする．**図 3** の赤い矩形で囲まれた建物がその一例である．特徴点の抽出とマッチングには AKAZE[2] を用いる．なお，画像全体に遠方の対象を撮像することは困難であるため，カメラの向きを変えることによって遠方の対象を画像中の様々な位置で撮像し特徴点を抽出することによって，画像全体に対して特徴点が得られるようにする．また，左右画像の特徴点のユークリッド距離が大きい点ははずれ値として除去する．

3.2 視差オフセットマップ

特徴点の視差誤差から全画素に対する視差誤差を求めたマップを作成する．これを視差オフセットマップと呼ぶ．画素の視差誤差を算出する概念図を**図 4** に示す．各画素の視差誤差は，その画素の周囲にある特徴点を用い，画素と点の距離 d_k に応じて重み w_k を付与した重み付き平均により算出する．特徴点 (u_k, v_k) の視差誤差 e_{uk}，e_{vk} から画素 (i, j) の視差誤差 e_i，e_j を次式で求める．

$$e_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} w_k \cdot e_{uk}}{\sum_{k=1}^{n} w_k} \tag{2}$$

$$e_j = \frac{\sum_{k=1}^{n} w_k \cdot e_{vk}}{\sum_{k=1}^{n} w_k} \tag{3}$$

$$w_k = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left\{-\frac{d_k^2}{2\sigma^2}\right\} \tag{4}$$

$$d_k = \sqrt{(u_k - i)^2 + (v_k - j)^2} \tag{5}$$

また，式 (4) は 2 次元ガウス分布に従っており，σ は標準偏差を表す．画素の視差誤差を求める周囲の特徴点は画素からしきい値以下の距離の点に制限する．n はこの時の特徴点の点数である．周囲の点がしきい値以内に存在しなかった場合はその画素の視差誤差は不定とする．

3.3 視差オフセットマップによる画像補正

視差オフセットマップの画素の視差誤差をもとに画像を補正する．本論文では左画像に補正を行う．画素 (i, j) から視差誤差を補正した画素 (n, m) は式 (6)(7) で表すことができる．

$$n = i - e_i \tag{6}$$

$$m = j - e_j \tag{7}$$

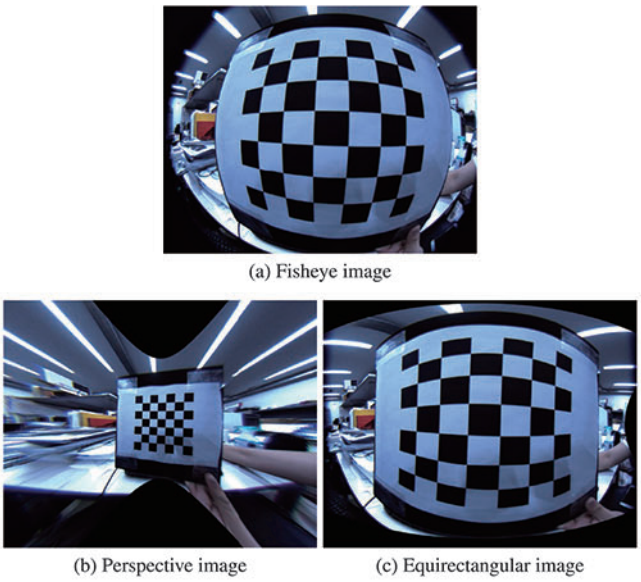


Fig.1 Transformed images from a fisheye image

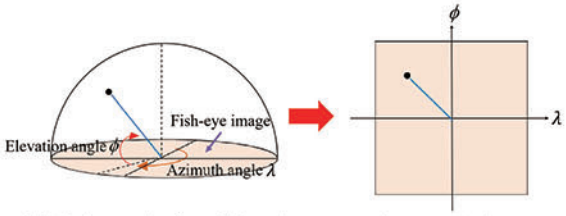


Fig.2 Conversion from fisheye image to equirectangular image

Fig.3 Target with a known distance on an equirectangular image

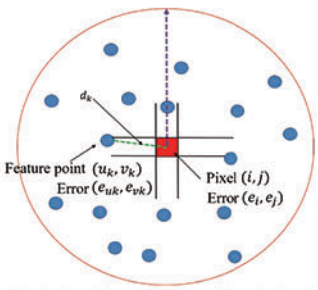


Fig.4 Method of calculating disparity error of a pixel using feature points

Fig.5 Fisheye stereo camera

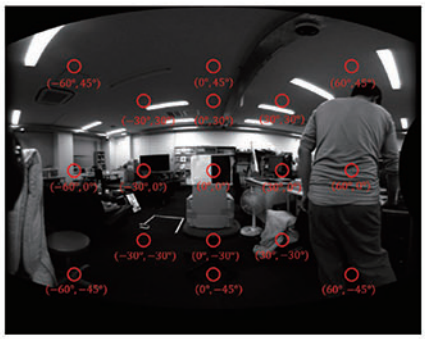


Fig.6 Experimental environment

4. 距離計測精度の評価実験

4.1 実験条件

提案手法を用い，距離計測精度の評価実験を行った．**図 5** に構築した魚眼ステレオカメラを示す．カメラは Point Grey Research 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[11] 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．なお，魚眼レンズの画角は 180° であるが，魚眼ステレオカメラの画角がそれより小さくなっているのは，ステレオマッチングにおける視差探索のマージンが必要なこと，ならびに画像内にイメージサークルが収まりきっていないこと（図 **1**(a) 参照）などによる．ステレオマッチングはテンプレートマッチング，類似度には輝度の絶対値和 (SAD) を用いテンプレートサイズは 7×7，視差探索範囲は 48 pixel とした．実験環境を**図 6** に，計測箇所を色別で表記した図を**図 7** に示す．計測距離は 1 m，5 m とし計測対象は白黒の紙の境とした．なお，本研究の魚眼ステレオカメラは，近距離での利用を想定しており，想定される計測レンジの近・遠の典型的な距離としてこれらの値を選択した．距離計測結果は注目点と上下の 2 点ずつ計 5 点の計測値の平均を 1 回の計測値とし，5 回計測を行って平均と標準偏差を求めた．図 3 の赤い矩形で囲まれた距離約 300 m の建物を対象に特徴点を抽出した．この時，視差は約 0.07 pixel とほぼ 0 になる．視差が大きすぎる点は誤対応によるはずれ値と見なせるので，ユークリッド距離 10 pixel 以下の点を使用した．撮像枚数は 230 枚，点数は 23239 点であった．視差オフセットマップ作成の際のしきい値を以下に示す．

(Cond.1) Euclidean distance = 50 pixel, $\sigma = 25$ pixel.

(Cond.2) Euclidean distance = 100 pixel, $\sigma = 50$ pixel.

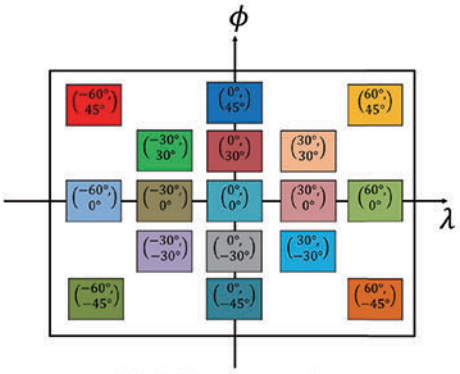


Fig.7 Measurement points

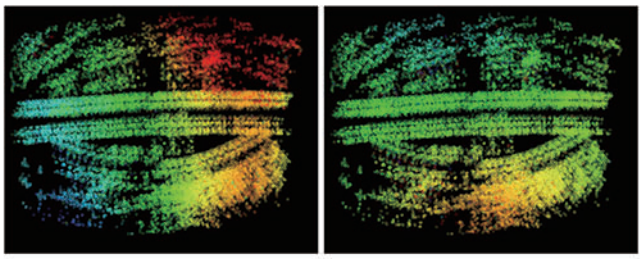
4.2 実験結果

図 8 に特徴点の視差誤差を，**図 9**，**10** に図 8 から得られた視差オフセットマップを示す．マップ補正なしとありの距離画像を**図 11** に，図 11 の距離画像で大きく距離値が変化している左側の箇所を拡大した画像を**図 12** に，計測距離の誤差と標準偏差を**図 13**，**14** に示す．図 8，9，10 は青色から赤色が視差の誤差 −5.0∼5.0 pixel に対応する．ただし −5.0 pixel 以下は青色，5.0 pixel 以上は赤色，周囲に点がなく視差誤差が求まらない箇所は黒色とした．図 11 は赤色から青色がカメラまでの距離 0.0 m∼10.0 m に対応し 10.0 m 以上は青色とした．図 13，14 の棒グラフの色は図 7 の計測箇所に対応している．

図 9，10 のマップは図 8 の視差誤差に対応した色となった．マップに円弧状の模様があるのは図 8 の特徴点が疎な部分など画素の視差誤差を求めるのに用いた特徴点が少ないためと考えている．また，視差オフセットマップに，右上は大きくプラス，左下は大きくマイナスなど，方向によって顕著な非等方性が認められる．これは，構築した魚眼ステレオカメラの各魚眼カメラの非等方性に対応したものであると言える．視差オフセットマップのしきい値の 2 つの条件においてはユークリッド距離が大きい条件 2 においてマップの範囲は広く，色（視差）の変化が滑らかで，マップにある円弧状の模様も少ないことが分かる．

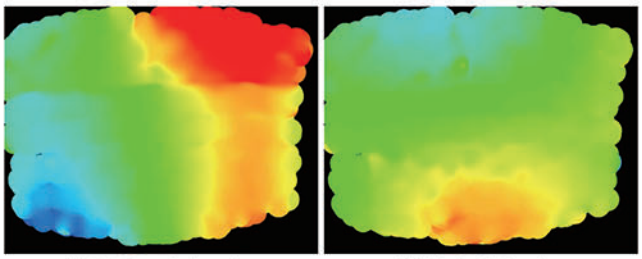
図 11 の距離画像は図 9，10 のマップにより補正され，特に図 12 の遠くにある壁の部分など遠距離にある対象物の距離値が改善されていることが分かる．また，図 13，14 より，補正を行うことにより誤差が小さくなっていることが分かる．距離 1 m では最大約 0.16 m，5 m では最大約 1.0 m まで誤差が小さくなった．1 m より 5 m の結果のほうが誤差の改善の程度が大きいのは，遠方の対象に対してオフセットマップを求めているためであると考えている．また，補正ありで誤差が大きい箇所は，図 8 において特徴点が疎な箇所や特徴点の視差誤差に偏りが大きい箇所だと考えている．視差オフセットマップの条件 1 と 2 においては距離精度に差はほぼない結果となった．なお，図 13(a), 14(a) の補正なしの結果においても，方向による非等方性が観測される．図 14 の 5 m の場合では，視差オフセットマップにより非等方性が概ね補正できているが，図 13 の 1 m の場合では，補正が過剰に行われており，そのため誤差の改善の程度が小さくなっている．

また，計測した平均計測値の視差と真の距離の視差とのずれの評価も行った．**図 15**，**16** に計測距離に対する視差誤差を示す．ただし評価したのはマップ補正なしと条件 1 のマップ補正のみとした．図 15，16 より，補正を行うことにより距離計測



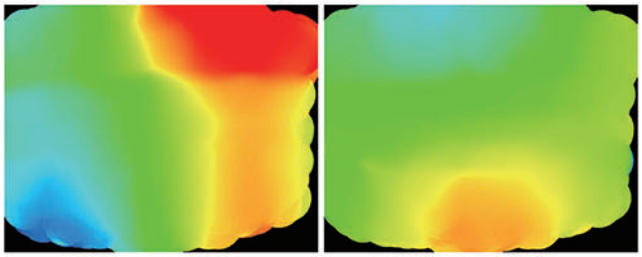
(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

Fig.8 Disparity errors of feature points



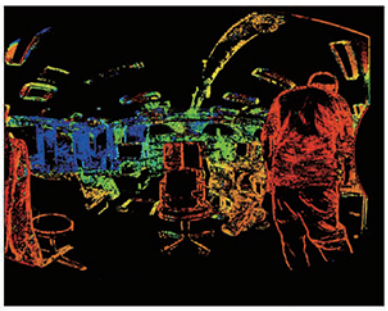
(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

Fig.9 Disparity offset map (Cond.1)

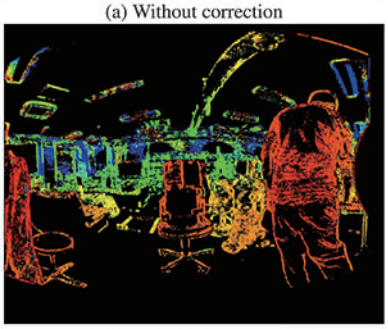


(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

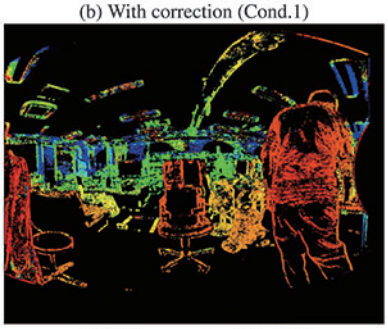
Fig.10 Disparity offset map (Cond.2)



(a) Without correction

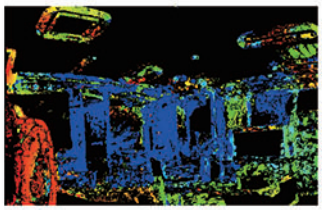


(b) With correction (Cond.1)

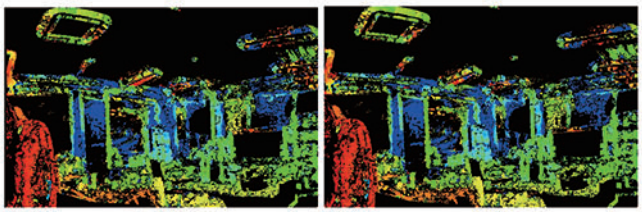


(c) With correction (Cond.2)

Fig.11 Range images



(a) Without correction



(b) With correction (Cond.1) (c) With correction (Cond.2)

Fig.12 Range images (expand)

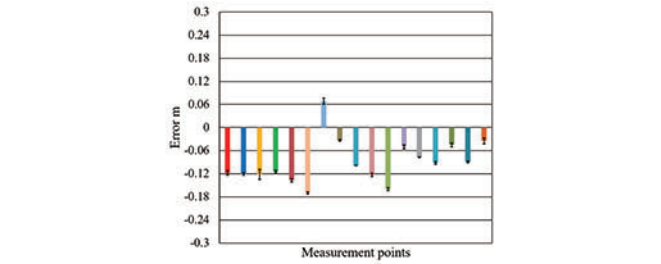
の結果同様に視差誤差は小さくなり，5 m における視差誤差は最大約 0.92 pixel で補正がサブピクセルレベルで行われていることが分かる．ステレオ計測において距離が長くなるにつれ視差誤差による計測誤差は大きくなるため，1 m より 5 m の視差誤差が小さくても計測誤差は大きくなっている．1 m より 5 m の結果のほうが誤差の改善の程度が大きいのは，距離計測同様に遠方の対象に対してオフセットマップを求めているためであると考えている．

さらに，より広い画角での提案手法の有効性を検証するため，距離 5 m，仰角 0°，条件 1 で，15° ごとに ±75° の範囲での実験を行った．結果を図 **17** に示す．(b) が補正なし，(c) が補正ありである．全体としては，視差オフセットマップによる補正で距離計測精度が向上している．一方で，補正なしで方位角がプラスである程誤差がマイナスになっているのに対し，補正ありでは逆の傾向となっており，全体として過補正の傾向が見られる．また，±75° では補正後も誤差は大きく，特に +75° では補正なしよりも距離値自体の誤差は大きくなっている（ただし，視差の誤差は小さくなっている）．

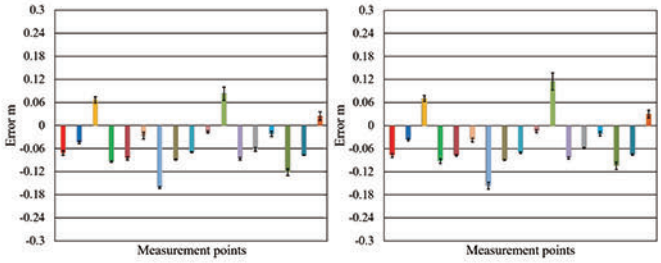
以上より，提案手法の一定の有効性を示せた一方で，より広い画角での視差補正にまだ課題が残っていることが示された．

5. 結　　論

本論文では，既知の距離にある対象を撮像した画像から抽出される特徴点の視差の誤差から視差オフセットマップを作成し，それを用いて画像補正をすることにより，正距円筒画像を用いた魚眼ステレオカメラの距離計測精度を向上できることを示した．また，視差の評価も行いサブピクセルレベルの画像の位置合わせが可能であることを示した．今後は，視差誤差に用いる特徴点の選定方法の改善，近距離の対象に変更しての視差オフセットマップでの検証，近距離の対象と遠距離の対象から得られた複数のマップを複合させて画像補正を行うなど更なる精度向上を目指す．

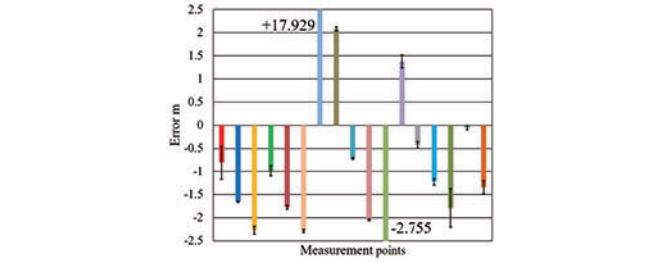


(a) Without correction

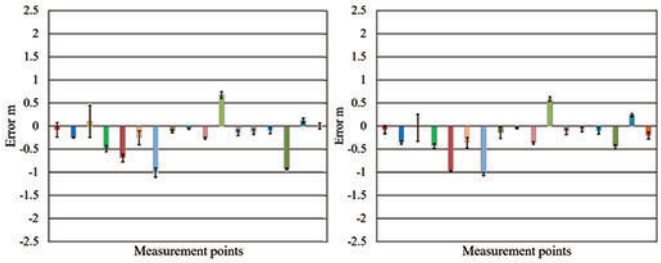


(b)With correction (Cond.1) (c)With correction (Cond.2)

Fig.13 Distance measurement error and standard deviation for 1 m

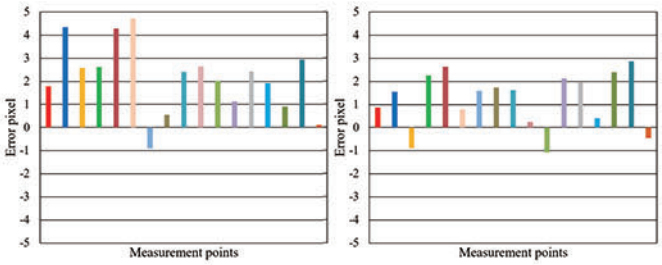


(a) Without correction



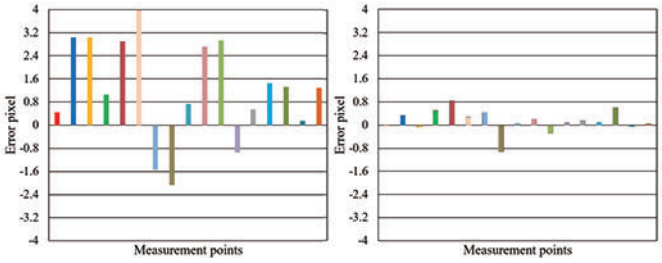
(b) With correction (Cond.1) (c) With correction (Cond.2)

Fig.14 Distance measurement error and standard deviation for 5 m



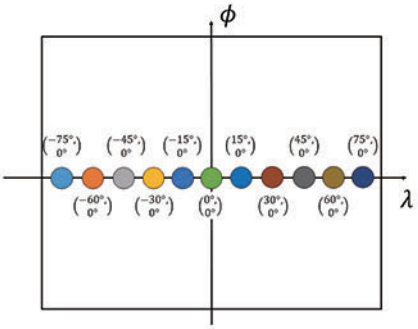
(a) Without correction (b)With correction (Cond.1)

Fig.15 Disparity error for 1 m

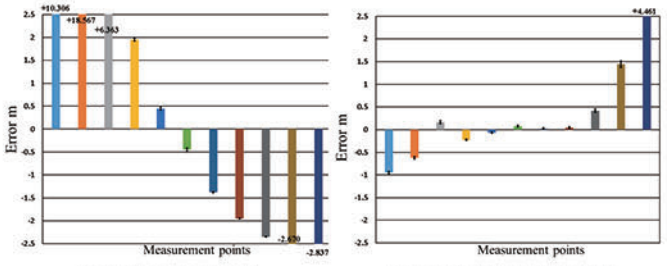


(a) Without correction (b) With correction (Cond.1)

Fig.16 Disparity error for 5 m



(a) Measurement points



(b) Without correction (c) With correction (Cond.1)

Fig.17 Distance measurement error for wider azimuth angles (distance: 5 m, elevation angle: 0°)

参 考 文 献

1) S. Abraham et al.: Fish-eye stereo calibration and epipolar rectification, ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing, **59**, 5, (2005) 278.
2) J. Moreau et al.: Equisolid fisheye stereovision calibration and point cloud computation, Proc. of ISPRS2013, XL-7/W2, (2013) 167.
3) C. Hane et al.: Real-time direct dense matching on fisheye images using plane-sweeping stereo, Proc. of 3DV2014, **1**, (2014) 57.
4) N. Krombach et al.: Evaluation of stereo algorithms for obstacle detection with fisheye lenses, Proc. of ISPRS2015, II-1/W1, (2015) 33.
5) P. Furgale et al.: Toward automated driving in cities using close-tomarket sensors: An overview of the V-Charge Project, Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (2013).
6) S. K. Gehrig,: Large-field-of-view stereo for automotive applications, Proc. of OmniVis2005, (2005).
7) D. Kim et al.: Rear obstacle detection system with fisheye stereo camera using HCT, J. Expert Systems with Applications, **42**, 17, (2015) 6295.
8) A. Ohashi et al.: Fisheye stereo camera using equirectangular images, Proc. 11th France-Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics, (2016) 284.
9) 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, **83**, 12 (2017) 1095.
10) 山野 史登, 飯田 浩貴, 梅田 和昇, 大橋 明, 福田 大輔, 金子 修造, 村山 純哉, 内田 吉孝：視差オフセットマップによる魚眼ステレオカメラの高精度化，2018 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, (2018) 271.
11) D. Scaramuzza et al.: A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras, Proc. of IROS2006, (2006) 5695.
12) P. F. Alcantarilla et al.: Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces, Proc. of BMVC2013, (2013).