

正距円筒画像のステレオ平行化

○ 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‡

○ Akira Ohashi †, Fumito Yamano †, Gakuto Masuyama †, Kazunori Umeda †, Daisuke Fukuda ‡, Kota Irie §, Shuzo Kaneko ‡, Junya Murayama ‡, and Yoshitaka Uchida ‡

†: 中央大学理工学研究科, ohashi@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

‡: クラリオン株式会社

§: Hitachi Automotive Systems Americas

<要約> 本論文では2つの魚眼カメラを用いたステレオカメラの平行化手法の提案を行う。任意の環境内から得た特徴点群から平行化パラメータを推定し、左右カメラの位置・姿勢のずれに起因する誤差を除去する。補正を行ったステレオカメラの性能は距離画像生成によって評価する。

<キーワード>ステレオ視, 魚眼カメラ, 平行化, 距離画像

1. 序論

近年、自動車の運転支援のためのカメラや3次元計測センサなどの装着例が増加している。しかし、距離計測の角度分解能の低さ、検知範囲の狭さなどにより特殊な状況下での障害物を検知できないことが問題となっている。そこで本論文では、魚眼カメラとステレオカメラに焦点を当てる。魚眼カメラの視野角は180度以上であり、その大きさは比較的小さい。また、ステレオカメラはカメラを二つ並べることにより密な距離計測を可能とする。したがって、魚眼カメラを用いてステレオカメラを構築することによって、検知範囲が広い距離計測が可能となる。さらに、ソナーなどのように車体に埋め込む必要がないため、車両またはロボットに容易に搭載できることも利点である。このような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 と Forstner [1]は、魚眼ステレオカメラのステレオ画像を平行化することによってステレオマッチングを単純化した。Moreau ら[2]は、等立体角投影モデルの魚眼画像のエピポーラ拘束について述べ、ステレオカメラを用いて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][6][7]などの実用的なプラットフォームに魚眼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強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ふ。そこで我々はこの問題を解決する方法として正距円筒投影を用いた魚眼ステレオカメラを提案している[8]。正距円筒投影は、魚眼画像を魚眼レンズの半球上の緯度と経度を縦軸と横軸においた直交座標系の画像に変換する。正距円筒投影は、周辺領域を強く伸ばすことなく、対応点探索を単純化することができる。しかし、画像補正の精度が低く、距離計測精度が高くないこと、また、距離計測中に補正パラメータを更新できないことが問題であった。本論文では、距離計測中での補正パラメータの更新を可能とするために、任意環境を撮像した正距円筒画像を用いてステレオ平行化を行う。ステレオ平行化により、距離計測が高精度化されることを実験により示す。

2. 魚眼ステレオカメラの概要[8]

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，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[9] が提案しているカメラモデルを用いて内部パラメータを算出し，カメラの個体差による影響を補正する．

2.2 正距円筒投影

Fig. 1 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取り去る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，比較的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を簡単化させる投影法として，本論文では正距円筒投影を用いる．正距円筒投影は横軸と縦軸を方位角と仰角にとった座標に投影するため，角度に比例した射影方式の魚眼画像に対して無理なく変形でき，引き伸ばしや歪みの少ない画像を作成することができる．具体的な正距円筒画像の生成プロセスは次の通りである．

- ① Fig. 2 (a) に示す正距円筒画像の注目画素位置 p' を Fig. 2 (b) の円筒モデル上の点 q' に投影する．
- ② 円筒モデル上に投影した点 q' を Fig. 2 (c) の極座標上の点 q に変換する．
- ③ 極座標上に変換した点 q にカメラの内部パラメータを用いることにより Fig. 2 (d) の魚眼画像上の点 q に変換する．
- ④ 魚眼画像上の点 q の画素を正距円筒画像の点 p に投影する．

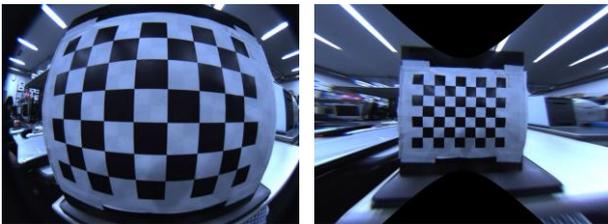


Fig. 1 透視投影による引き伸ばし

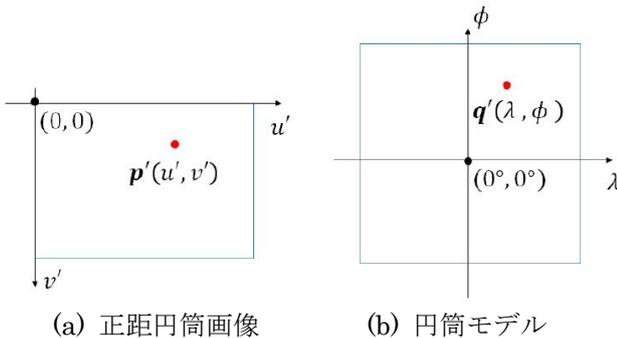


Fig. 2 正距円筒画像の生成プロセス

2.3 対応点探索

画像間の対応点探索にはテンプレートマッチングを用いる．類似度には輝度の差の絶対値和 (SAD) を用いる．方位角 λ が 0 の時の仰角 ϕ を ϕ_0 とすると，正距円筒画像のエピポーラ線は式 (1) で表せる．

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

この式をの ϕ_0 を $\pm 90 \text{ deg}$ ， $\pm 75 \text{ deg}$ ， $\pm 60 \text{ deg}$ ， $\pm 45 \text{ deg}$ ， $\pm 30 \text{ deg}$ ， $\pm 15 \text{ deg}$ ， 0 deg に固定した際の ϕ の軌跡，つまり，正距円筒画像上のエピポーラ線の軌跡を Fig. 3 に示す．Fig. 3 の座標は横軸，縦軸が魚眼ステレオカメラにおける方位角，仰角に対応している．正距円筒画像でのステレオマッチングの際はこの曲線上で対応点探索を行う．

2.4 計測点の 3 次元位置

計測対象とカメラ間のユークリッド距離 D (注：光軸方向の距離ではない．以後は単に距離と表記) は，基線長を b ，焦点距離を f ，左右の画像の対応点間の視差を Δu ，撮像素子のピクセルサイズを S とすると次式で計算できる．

$$D = \frac{bf \cos \phi}{S \Delta u \cos \lambda} \quad (2)$$

式 (2) より，カメラを縦に並べた方が水平方向に対する計測精度は向上することが分かる．しかし，車

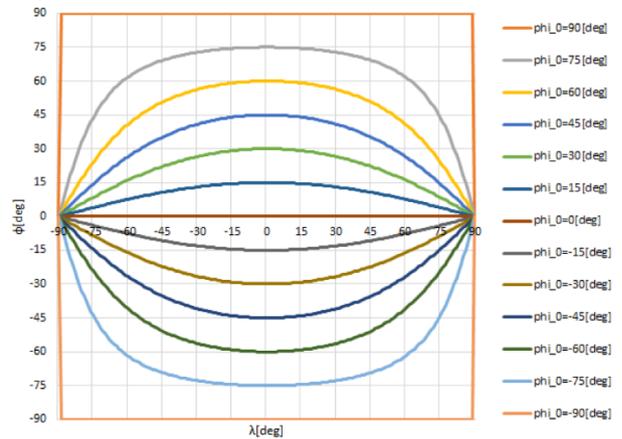
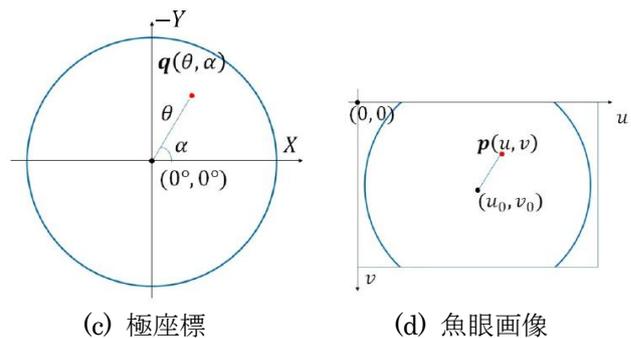


Fig. 3 正距円筒画像上のエピポーラ線



(d) 魚眼画像

載用などでの使用を想定すると、縦方向の配置は困難であることが予想されるため、本研究ではカメラを横に並べて配置する。

3. ステレオ平行化

3.1 透視投影画像のステレオ平行化

多くのステレオカメラは左右のカメラが完全に平行であることを仮定しているが、実際はカメラの位置や姿勢のずれにより誤差が発生する。そのため、カメラの位置や姿勢のずれを推定し、画像の補正によってずれの影響を除去する必要がある。これに対し、ステレオ平行化 (Rectification) [10][11] と呼ばれる手法が提案されている。ここで、左右カメラの姿勢を R_l と R_r 、位置を T_l と T_r とし、右カメラを基準としたときの透視投影画像の平行化手法を以下に示す。

① 基礎行列を 5 点アルゴリズムにより推定

② R_l , T_l を基礎行列から算出

③ 式 (3) ~ (8) より R_{rect} を算出

$$(R_r = I \text{ (単位行列)}, T_r = 0)$$

$$R = R_l^T \quad (3)$$

$$T = T_l \quad (4)$$

$$e_1 = \frac{T}{\|T\|} \quad (5)$$

$$e_2 = \frac{T}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} [-T_y \quad T_x \quad 0]^T \quad (6)$$

$$e_3 = e_1 \times e_2 \quad (7)$$

$$R_{rect} = \begin{pmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{pmatrix} \quad (8)$$

④ 左画像の補正行列を $R_{rect}R$ 、右画像の補正行列を R_{rect} とし、画像に掛け合わせる。

以上により左画像・右画像が平行化され、各点に対応するエピポーラ線が、同一行の水平な直線となる。

3.2 正距円筒画像のステレオ平行化

3.1 節のステレオ平行化手法を正距円筒画像に適用するために、本研究では正距円筒画像上の点群の座標を透視投影座標に変換し、手順に従い補正行列を画像に掛け合わせた後に元の座標に戻すことで正距円筒画像のステレオ平行化を行う。正距円筒座標 (λ, ϕ) から透視投影座標 (x, y, z) への変換式及び逆変換式を式 (9), (10) に示す。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan \lambda \\ \tan \phi \\ \frac{\cos \lambda}{1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan^{-1} \frac{x}{y} \\ \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \end{pmatrix} \quad (10)$$

4. ステレオ平行化シミュレーション

3.1 節, 3.2 節のステレオ平行化手法自体の外部パラメータ推定精度, 画像補正精度を評価するためにシミュレーションを行う。手法としては仮想的な 3 次元点を正距円筒画像に投影し, 3 章の手法により平行化する。

4.1 シミュレーション条件

魚眼ステレオカメラの基線長を 52mm, 計測対象はカメラの光軸方向 2m 先の横 (x), 縦 (y)16m の範囲で, x, y 方向に 0.1[m] 刻みで 25921 組の対応点が取得できたと仮定する。また, 並進成分推定の安定化のために, 各特徴点の光軸方向の距離は平均 2m に標準偏差 0.5m の正規分布に従うばらつきを加える。カメラ位置, 姿勢については, 右カメラを固定し, 左カメラを次のように動かした。

① 無回転・無移動

② x, y, z 軸反時計回りに 5 度, 上, 奥方向に 5mm

③ ②に加え正距円筒画像上の特徴点の u, v 座標に 1.0pixel のばらつきを与える

③においては RANSAC をかけることによりばらつきの大きい点を除去し, パラメータ推定の高精度化を行う。RANSAC の評価値は透視投影座標上での対応点間の y 方向ずれ量とする。RANSAC の閾値は 0.001, RANSAC のサンプル数は 6 組, RANSAC のループ数は 10000 回とする。

4.2 シミュレーション結果

前節の条件①, ②, ③の結果を, それぞれ Fig.4, 5, 6 に示す。視差が平行になっていることを評価するために, 透視投影画像は中央部分を 5 倍に拡大している。条件③のシミュレーションにおいて, 最終的な補正の結果, 評価値の閾値以内の点は 1900 点であった。この点を Fig. 6 (d), (e), (f) に示す。赤い線が視差, 色付きの丸の中心が左画像上の特徴点, 丸がついていない側の赤い線の端が右画像上の特徴点, 黄色い線が左画像の特徴点から伸ばしたエピポーラ線, 紫色の線が右画像の特徴点から伸ばしたエピポーラ線である。また, 条件①, 条件②のシ

シミュレーションにおいて、 x, y, z 軸の回転量（ロール、ピッチ、ヨー）と y 方向、 z 方向の並進移動量の推定誤差は 0 であった。条件③のシミュレーションの際に推定されたパラメータを Table 1 に示す。

4.3 考察

条件①、②の外部パラメータが誤差なく推定されたこと、Fig. 4 (e)、Fig. 5 (e) において視差が水平になっていることから、条件①、②のシミュレーションにおいて平行化は成功しているといえる。また、Table 1 より条件③のシミュレーションの際の外部パラメータの推定は若干の誤差を持つが、Fig. 6 (f) より評価値の閾値を満たす点が画像全体に散らばっているため、平行化は成功していると考えられる。

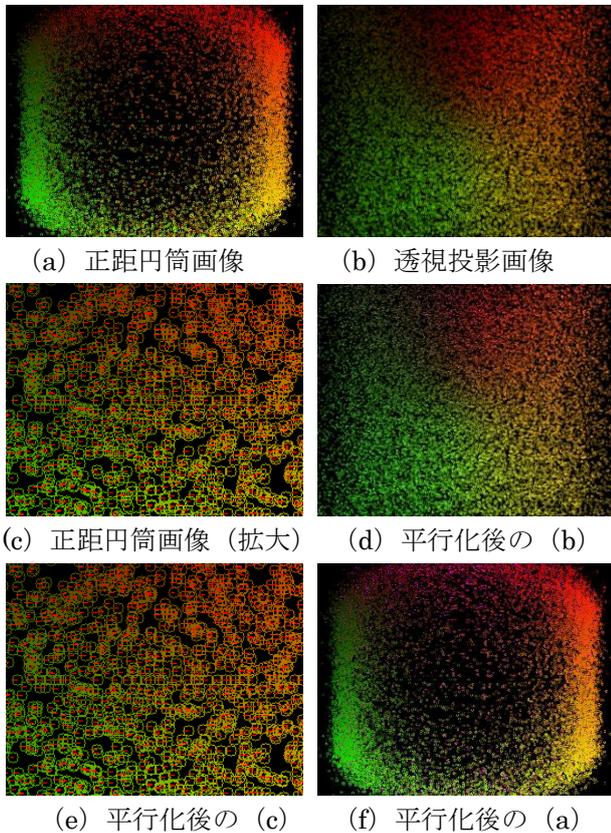


Fig. 4 無回転・無移動の際の平行化

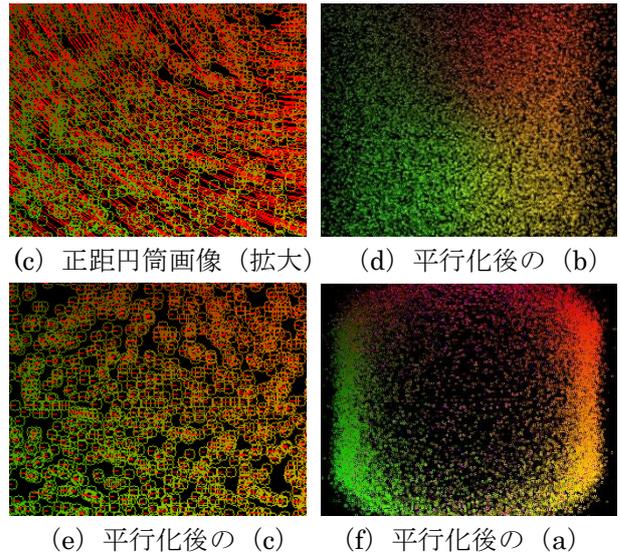
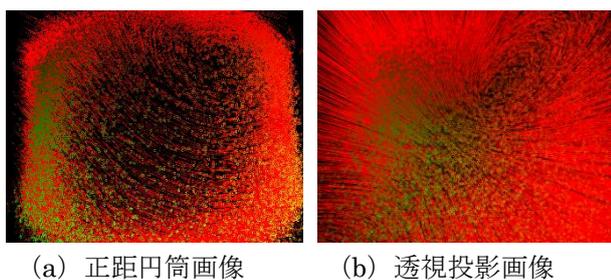


Fig. 5 回転・並進がある際の平行化

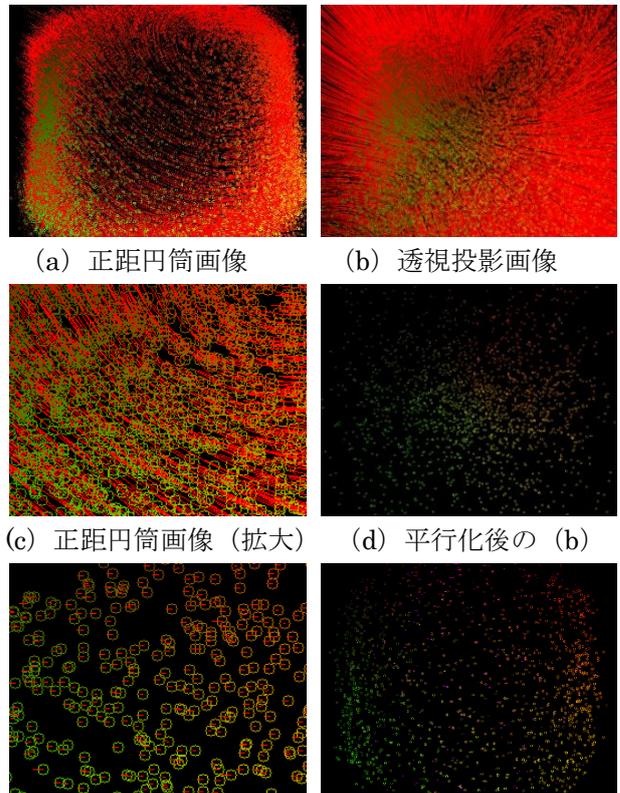


Fig. 6 回転・並進、ばらつきがある際の平行化

Table 1 左カメラの回転並進量の推定誤差

	真値	推定値	誤差[%]
ロール[°]	5	4.983	0.340
ピッチ[°]	5	4.977	0.460
ヨー[°]	5	5.055	1.100
y [mm]	1	1.080	8.000
z [mm]	-1	-1.050	5.000

5. ステレオ平行化実験

5.1 実験条件

これまで述べた提案手法を用い、距離画像生成を行った。CMOSカメラはPoint Grey Research社のFlea3、魚眼レンズはSPACE社のTV1634Mを用いた。解像度は 1328×1048 [pixel]、基線長は 52 [mm]である。距離計測範囲は水平方向が 165 [deg]、垂直方向が 132 [deg]である。ステレオマッチングにおいて右方向に対応点探索を行っているため、水平方向の距離計測範囲はカメラの水平画角よりも狭い。TV1634Mの内部パラメータはMatlabのOcamCalib Toolbox[9]を利用して求めた。外部パラメータ及び左右カメラの補正行列は提案手法により求めた。左カメラ補正行列 R_{left} と右カメラ補正行列 R_{right} との推定結果を以下に示す。

$$R_{left} = \begin{pmatrix} 0.999 & -3.271 \times 10^{-2} & -2.462 \times 10^{-3} \\ 3.271 \times 10^{-2} & 0.999 & -5.725 \times 10^{-4} \\ 2.479 \times 10^{-3} & 4.917 \times 10^{-4} & 1.000 \end{pmatrix}$$

$$R_{right} = \begin{pmatrix} 1.000 & -1.980 \times 10^{-2} & -9.114 \times 10^{-3} \\ 1.980 \times 10^{-2} & 1.000 & -1.804 \times 10^{-4} \\ 9.116 \times 10^{-3} & 0.000 & 1.000 \end{pmatrix}$$

この推定結果を見ると、各カメラの補正行列は単位行列に近く、使用した魚眼ステレオカメラはほぼ平行な状態であったことが分かる。

5.2 実験結果

Fig. 7は実験環境を魚眼ステレオカメラで撮像した魚眼画像、Fig. 8はFig. 7を正距円筒投影した画像、Fig. 9は平行化を適用しなかった場合の視差画像及び距離画像、Fig. 10はFig. 8から作成した視差画像及び距離画像である。Fig. 9, 10 (a), (b)は赤から青の色がそれぞれ $1 \sim 48$ pixel、 $0.5 \sim 10$ mに対応している。

5.3 考察

Fig. 9, 10を比べると、Fig. 9は画像の手前も奥も似たような距離として計測されているが、Fig. 10は手前と奥が異なる距離として計測できていることがわかる。これは、ずれによる視差の増加の影響が支配的だった視差の小さい対応点が、平行化により補正されたからだと考えられる。しかし、照明部分で誤マッチングを起こしている。この誤マッチングはマッチングの際にテンプレート内で同じような輝度パターンが連なって存在するために起こる問題であり、今後は該当部分の距離計測結果の調査をする必

要があると考えられる。また、具体的な距離計測精度が不明なため、定量的評価が必要である。



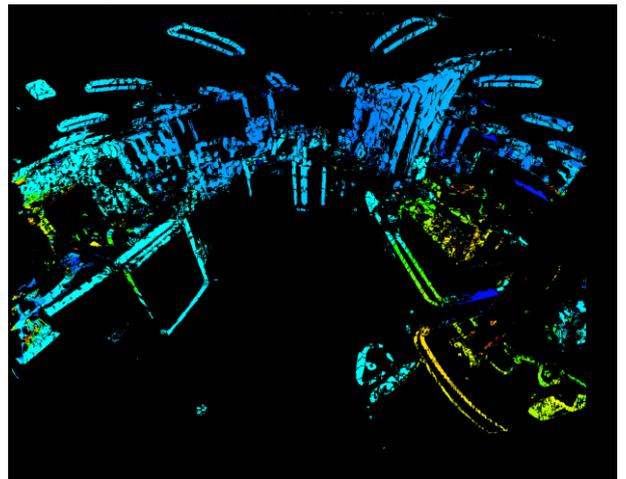
(a) 左画像 (b) 右画像

Fig. 7 実験環境を撮像した魚眼画像

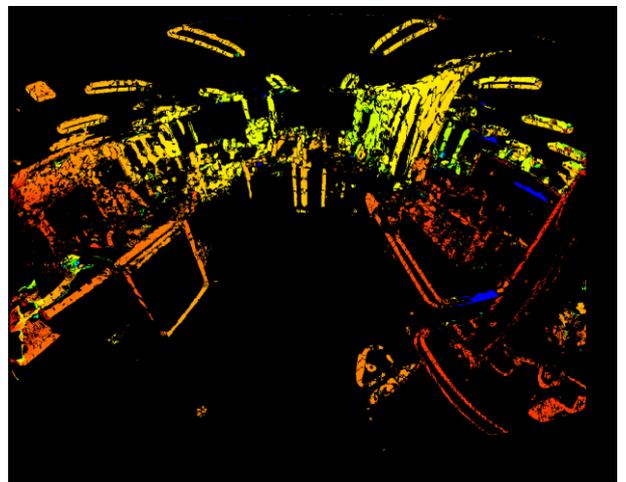


(a) 左画像 (b) 右画像

Fig. 8 実験環境を撮像した正距円筒画像

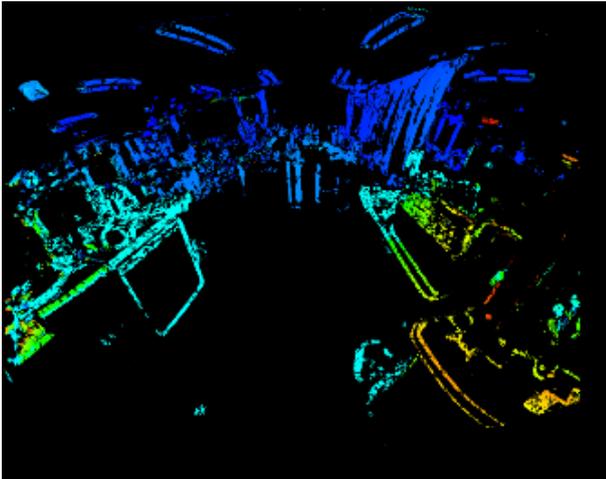


(a) 視差画像

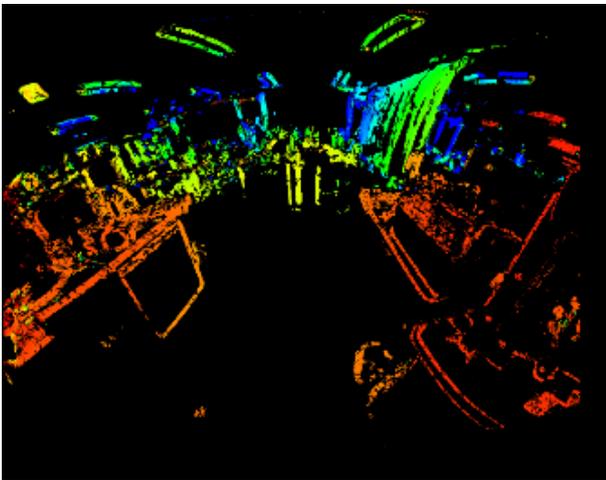


(b) 距離画像

Fig. 9 平行化を適用しなかった際の計測結果



(a) 視差画像



(b) 距離画像

Fig. 10 平行化を適用した際の計測結果

6. 結論

本論文では、魚眼ステレオカメラに正距円筒投影を適用することによる広範囲にわたる3次元計測手法に、任意環境を撮像した画像を用いたステレオ平行化を組み込むことで、距離計測中に補正パラメータを更新が可能なシステムを構築した。今後の展望としては、誤マッチングの除去及び距離計測精度の定量的評価を目指す。

参考文献

- [1] S. Abraham et al., Fish-eye stereo calibration and epipolar rectification, *Journal of ISPRS*, Volume 59, Issue 5, pp. 278-288, 2005.
- [2] J. Moreau et al., Equisolid fisheye stereovision calibration and point cloud computation, *Proc. of ISPRS*, Volume XL-7/W2, pp.167-172, 2013.
- [3] C. Hane et al., Real-time direct dense matching on fisheye images using plane-sweeping stereo, *Proc. of 3DV*, Volume 01, pp. 57-64, 2014.
- [4] N. Krombach et al., Evaluation of stereo algorithms for obstacle detection with fisheye lenses, *Proc. of ISPRS*, Volume II-1/W1, 2015
- [5] P. Furgale et al., Toward automated driving in cities using close-to-market 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 OmniVis*, Vol. 1, 2005.
- [7] D. Kim et al., Rear obstacle detection system with fisheye stereo camera using HCT, *Journal of Expert Systems With Applications*, vol. 42, no. 17, pp. 6295-6305, Oct. 2015.
- [8] 大橋 明 他, “正距円筒面画像への変換を用いた魚眼ステレオカメラの構築”, *Proc. of ROBOMECH*, 1A1-J09, 2015.
- [9] M. Rufli et al., Automatic detection of checkerboards on blurred and distorted images, *Proc. of IROS*, pp. 3121-3126, Nice, France, September 2008.
- [10] A. Fusiello et al., A compact algorithm for rectification of stereo pairs, *Proc. of Machine Vision and Applications*, 2000
- [11] R. I. Hartley, Theory and Practice of Projective Rectification, *Journal of Computer Vision*, 1999