

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*

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†††

Fisheye Stereo Camera Using Equirectangular Images

Akira OHASHI, Fumito YAMANO, Gakuto MASUYAMA, Kazunori UMEDA, Daisuke FUKUDA, Kota IRIE,
Shuzo KANEKO, Junya MURAYAMA and Yoshitaka UCHIDA

This paper proposes a stereo camera using two fisheye cameras. The measurement range of the stereo camera is increased by using fisheye cameras. Fisheye images are deformed by using an equirectangular projection to simplify the stereo correspondence search in the images. Stereo images are rectified to correct the influence of external parameters between a left camera and a right camera. Rectification parameters are estimated from feature points obtained from an image of an arbitrary environment. Errors due to deviation of the position and rotation of the left and right cameras are removed by the stereo rectification. The corresponding points are calculated by using stereo matching in the deformed image, and the distance is measured from the disparity. The performance of the fisheye stereo camera using equirectangular images is evaluated by simulations and experiments.

Key words: stereo vision, fish-eye camera, equirectangular image, rectification, range image

1. 序 論

近年、自動車の運転支援のためのカメラや距離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細長い物体やセンサを横切る物体の検知に制約がある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、その大きさも車載用途に用いるのに十分コンパクトであり、既に実車にも用いられている。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、車両やロボットに容易に搭載できることも利点である。

魚眼カメラを用いた従来研究には、レーン検出¹⁾、車両姿勢推定²⁾、障害物検出³⁾などの研究があり、他にも複数の魚眼カメラを使用した俯瞰画像生成⁴⁾⁵⁾に関する研究がある。また、魚眼ステレオカメラの従来研究に関しては以下のような研究がある。AbrahamとForstner⁶⁾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⁷⁾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⁸⁾は、planesweeping法を用いてリアルタイムの3次元計測を実現した。また、UAV⁹⁾や車両^{10)~12)}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う。

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する¹³⁾。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て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。このとき、画像補正の精度が低く、距離計測精度が高くないことが課題となる。また、車両用センサとして用いる場合は、車の走行や温度変化などによってカメラのパラメータが変動することがあり、オンラインでのカメラキャリブレーションが望まれる。そこで本論文では、オンラインでの外部パラメータの推定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

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¹⁴⁾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。

* 原稿受付 平成29年5月7日

掲載決定 平成29年8月31日

** 学生会員 中央大学大学院(現、(株)クラリオン；

埼玉県さいたま市中央区新都心11-2

ランド・アクシス・タワー30階)

*** 学生会員 中央大学大学院(東京都文京区春日1-13-27)

† 中央大学(現、名城大学；名古屋市天白区塩釜口1-501)

†† 正会員 中央大学(東京都文京区春日1-13-27)

††† (株)クラリオン

‡ Hitachi Automotive Systems Americas, Inc.
(34500 Grand River Avenue, Farmington Hills,
MI 48335 U.S.A.)

2.2 正距円筒投影

図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、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を以下に示す。

1. 図2(a)に示す解像度が $M \times N$ の正距円筒画像の注目画素位置 $p'(u', v')$ を図2(b)の円筒モデル上の点 $q'(\lambda, \phi)$ に投影する。

$$\lambda = \frac{\pi}{M} \left(u' - \frac{M}{2} \right) \quad (1)$$

$$\phi = -\frac{\pi}{N} \left(v' - \frac{N}{2} \right) \quad (2)$$

2. 円筒モデル上に投影した点 q' を図2(c)の極座標上の点 $q(\theta, \alpha)$ に変換する。

$$\theta = \cos^{-1}(\cos \phi \cos \lambda) \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\tan \phi}{\sin \lambda} \quad (4)$$

3. カメラの内部パラメータ $a_0 \sim a_4$ を用いて次式から ρ を求める¹⁴⁾。 $a_0 \sim a_4$ は半径方向のレンズの歪みを表す係数で、レンズの高さを4次までの式で近似した際の係数である。

$$a_0 + \left(a_1 + \frac{1}{\tan \theta} \right) \rho + a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3 + a_4 \rho^4 = 0 \quad (5)$$

4. 極座標上に変換した点 q を図2(d)の魚眼画像上の点 $p(u, v)$ に変換する。

$$u = \rho \cos \alpha + u_0 = \rho \frac{\sin \lambda}{\sqrt{\tan^2 \phi + \sin^2 \lambda}} + u_0 \quad (6)$$

$$v = \rho \sin \alpha + v_0 = \rho \frac{\tan \phi}{\sqrt{\tan^2 \phi + \sin^2 \lambda}} + v_0 \quad (7)$$

5. 正距円筒画像の点 p' の画素値を魚眼画像上の点 p の画素値から求める。

魚眼画像から正距円筒画像への変換の概念図を図3に示す。

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、正距円筒画像のエビポーラ線は次式で表せる。

$$\phi = \tan^{-1} (\tan \phi_0 \cos \lambda) \quad (8)$$

この式の ϕ_0 を 90° から -90° まで 15° ごとに固定した際の ϕ の軌跡、つまり、正距円筒画像上のエビポーラ線の軌跡を図4に示す。図4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。なお、正確にはテンプレートの形を画像の歪みに合わせて変形する必要があるが、正距円筒画像は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ため、単純にエビポーラ線上の各点を中心とした正方ウィンドウで近似して対応点探索を行っている。

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。

$$D = \frac{bf \cos \phi}{S \Delta u \cos \lambda} \quad (9)$$

式(9)から示されるように、魚眼カメラを水平に並べた場合、基線長がカメラ対象物間の方位角の増加に比例して減少するため、魚眼カメラを縦に並べた方が基線長の減少が無くなり、水平方向に対する計測精度は向上する。しかし、車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。



Fig.1 Comparison of a fisheye image and a perspective image

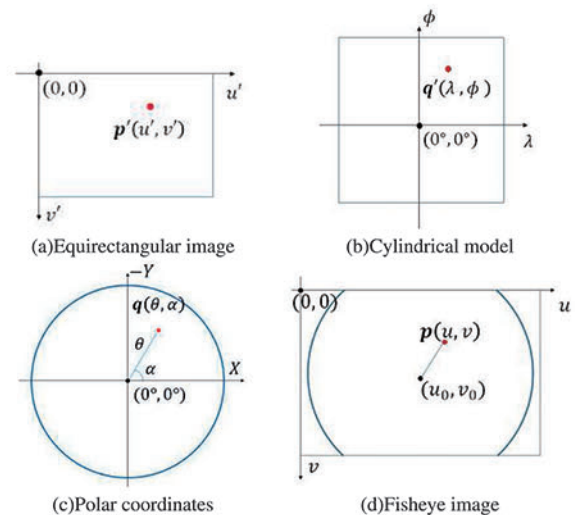


Fig.2 Process of generating an equirectangular image

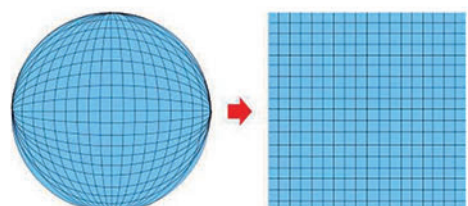


Fig.3 Conversion from fisheye image to equirectangular image

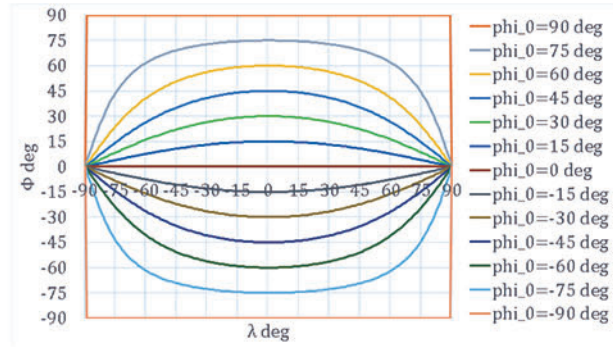


Fig.4 Epipolar lines on an equirectangular image

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)^{15, 16)} 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¹⁷⁾により推定
2. R_l , T_l を基礎行列から算出
3. 式 (10)~(15) より R_{rect} を算出

$$R = R_l^T \quad (10)$$

$$T = T_l \quad (11)$$

$$e_1 = \frac{T}{\|T\|} \quad (12)$$

$$e_2 = \frac{T}{\sqrt{T_x^2 + T_z^2}} [-T_y \ T_x \ 0]^T \quad (13)$$

$$e_3 = e_1 \times e_2 \quad (14)$$

$$R_{rect} = \begin{pmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{pmatrix} \quad (15)$$

4. 左画像の補正行列を $R_{rect}R$ 、右画像の補正行列を R_{rect} として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、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 (16), (17) に示す。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan \lambda \\ \frac{\tan \phi}{\cos \lambda} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan^{-1} x \\ \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \end{pmatrix} \quad (17)$$

4. ステレオ平行化シミュレーション

3 章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。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、計測対象は図 5 に示すようにカメラの光軸方向 2m 先の横 (x)、縦 (y)16m の範囲で、x, y 方向に 0.1m 刻みで AKAZE 特徴量¹⁸⁾による特徴点の対応点を取得し、161×161 の計 25921 組が取得できたと仮定する。また、並進成分の推定の縮退を防ぐために、各特徴点の光軸方向の距離に標準偏差 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 1mm
3. 条件 2 に加え正距円筒画像上の特徴点の u, v 座標に標準偏差 1pixel の正規分布に従う誤差を与える

条件 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、サンプル数は 6 組、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、それぞれ図 6, 7, 8 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 10 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。この点を図 8(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である。また、条件 1, 2 の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真値と推定値が一致し、誤差は生じなかった。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表 1 に示す。

4.3 考察

条件 1, 2 において、外部パラメータの真値と推定値が一致していることから示されるように外部パラメータが誤差なく推定されたこと、図 7 の (c) と (e) を比較すれば分かるように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、表 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特徴点の誤差に対応して誤差を持つが、図 8 では中心部の拡大図しか示していないが、画像全体で同様に視差が平行になっており、平行化は成功していると考えられる。また、表 1 の誤差は十分小さく、計測点の誤差が 1 pixel 程度であれば問題ないものとしている。

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。カメラは Point Grey Research 社の Flea3、魚眼レンズは SPACE 社の TV1634M を用いた。処理を行った PC の CPU は Intel 社の Core i7-4810MQ を用いた。さらに高速化のために NVIDIA 社の GPU である GeForce860M を用いて並列処理を行っている。解像度は 1328×1048 pixel、基線長は 52mm である。テンプレートサイズは 7×7 、視差探索範囲は 48pixel、1 ループの処理速度は 200ms、距離計測範囲は水平方向が 165° 、垂直方向が 132° である。水平方向が魚眼カメラの水平画角の 180° よりも狭くなっているのは、ステレオマッチングにおいて視差探索範囲分が削られるためである。また、垂直方向は、正距円筒変換の際に画像の横幅を 180° とした等角な投影を行っており、画像が横長であるため、さらに狭くなっている。TV1634M の内部パラメータは Matlab の OcamCalib Toolbox¹⁴⁾ 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。

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

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

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。また、距離計測精度評価のために箱を対象物として距離計測を行った。箱を置く距離はカメラからユークリッド距離で 1~5m を 1m 間隔とし、魚眼ステレオカメラの正面と左右に 60° 、上下に 60° 、さらに、斜め方向を加えた 9 点において距離計測を行った。実験環境と計測位置を図 9 に示す。なお、視差の計算は等角直線フィッティングによって、サブピクセル精度で行った。距離計測結果は注目点の周囲 25 点の平均計測距離を 5 回計測した平均値から RMS 誤差を算出した。

5.2 実験結果

図 10 は実験環境を魚眼ステレオカメラで撮像した魚眼画像、図 11(a) は図 10 を画角 165° で透視投影した画像、図 11(b) は図 10 を正距円筒投影した画像、図 12 は透視投影画像を用いた場合の視差画像及び距離画像、図 13 は正距円筒画像を用いた場合の視差画像及び距離画像である。図 12, 13(a), (b) は赤から青の色がそれぞれ 1~48pixel, 0.5~10m に対応している。図 14 はカメラから対象物までのユークリッド距離の真値と計測値を各距離における RMS 誤差で表したグラフである。

5.3 考 察

図 12, 13 を比べると、図 12 は画像の端において誤マッチングが多く、画像中央が縮小されているが、図 13 は画像の引き延ばしや縮小が無く、画像全体において距離計測ができていることがわかる。このことから、広範囲の距離計測を行う場合においては透視投影による画像の引き延ばしや縮小が距離計測の範囲及び密度を低下させること、正距円筒画像を用いた手法はそれらの問題を解消していることがわかる。しかし、蛍光灯部

分で誤マッチングを起こしている。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、図 14 より、中心や右の点など誤差が小さい箇所もあるが、全体的に距離計測精度が悪いことがわかる。カメラキャリブレーションにより内部・外部パラメータにより精度良い位置合わせはできているはずにも関わらず距離計測精度が悪いため、想定していない誤差が生じているものと考えられる。これは、魚眼レンズが非等方性の歪みを持っているためであると考えられ、精度の向上には非等方性の影響を打ち消す補正をする必要があると考えられる。

6. 結 論

本論文では、魚眼ステレオカメラに正距円筒面投影を適用することで、通常のスレオカメラと比較して広範囲のカラー画像取得と 3 次元計測が可能なることを示した。さらに、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、オンラインで外部パラメータを推定して画像補正に反映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向上を目指す。

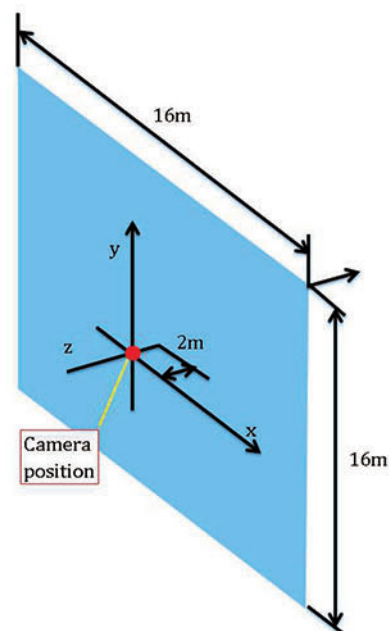


Fig.5 Simulation conditions

Table1 Estimated errors of rotation and translational amount of left camera

	true value	estimation value	error %
roll °	5	4.983	0.340
pitch °	5	4.977	0.460
yaw °	5	5.055	1.100
y mm	1	1.080	8.000
z mm	-1	-1.050	5.000

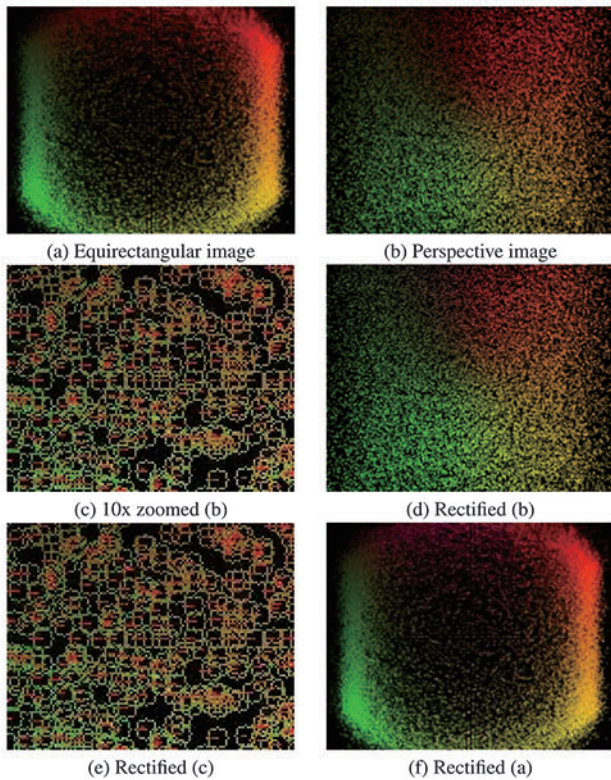


Fig.6 Rectification in condition 1

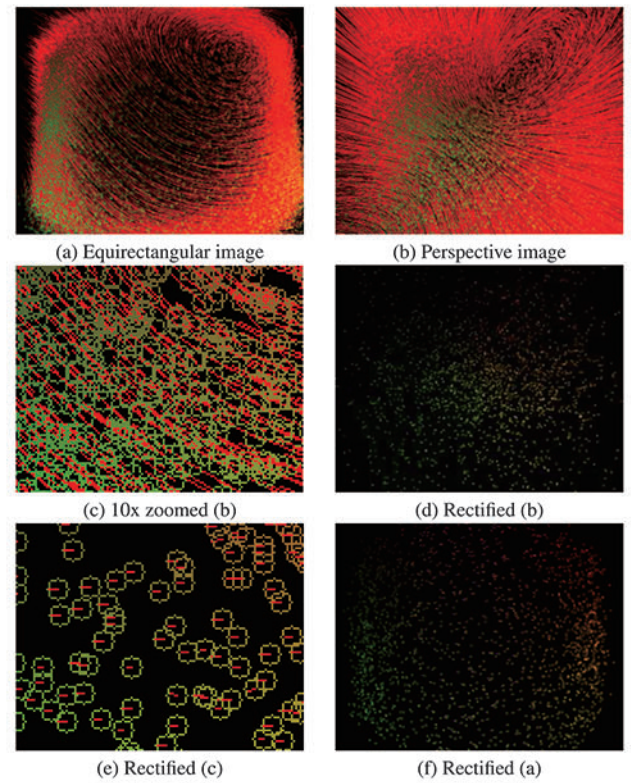


Fig.8 Rectification in condition 3

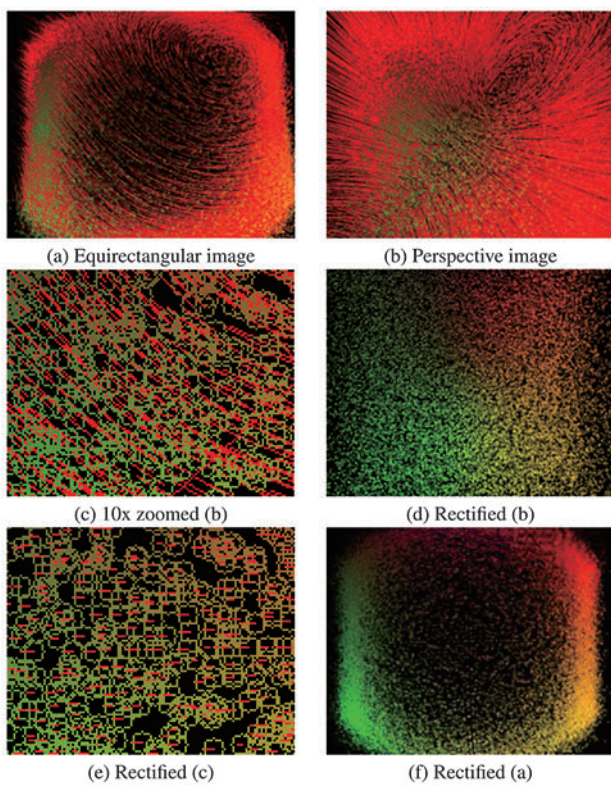


Fig.7 Rectification in condition 2

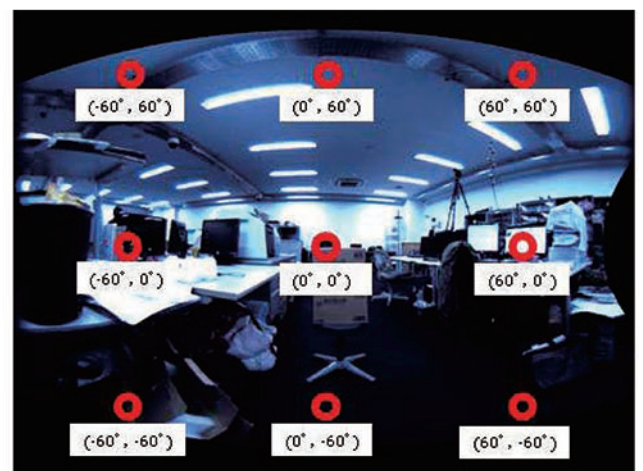


Fig.9 The positions to measure distance

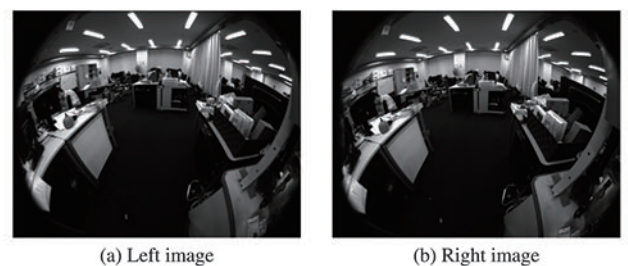
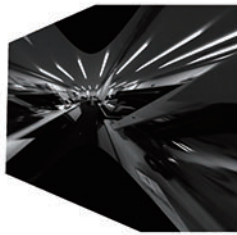


Fig.10 Fisheye images captured in the experimental environment

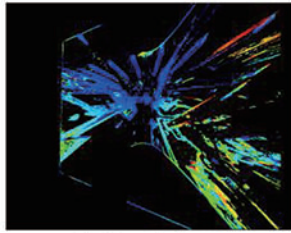


(a) Perspective image

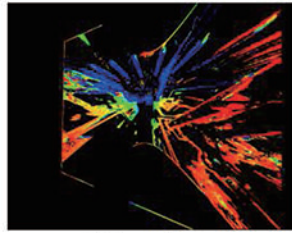


(b) Equirectangular image

Fig.11 Perspective image and equirectangular image converted from Fig. 10(a)

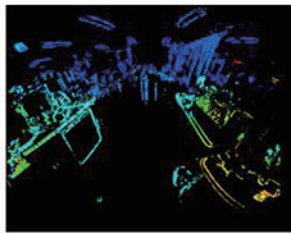


(a) Disparity image

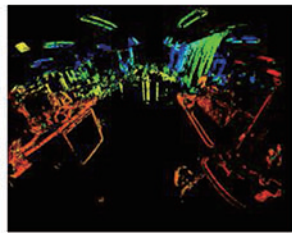


(b) Range image

Fig.12 Results of measurement using perspective images



(a) Disparity image



(b) Range image

Fig.13 Results of measurement using equirectangular images

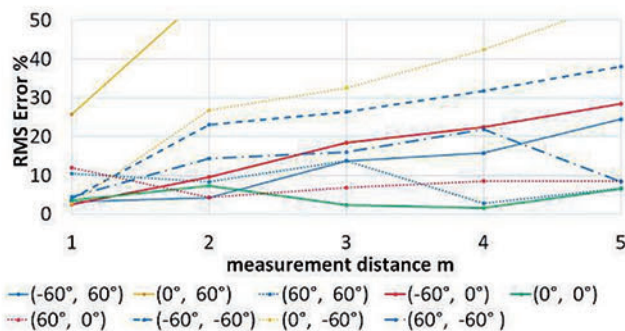


Fig.14 The distance measurement errors

参考文献

- 1) H. Kum et al.: Lane detection system with around view monitoring for intelligent vehicle, Proc. of ISOCC, (2013) 215.
- 2) S. Li et al.: Estimating vehicle pose relative to current lane from fisheye camera system, Trans. on the IEEEJ, **131**, 12, (2011) 2189.
- 3) C. T. Lin et al.: A real-time rear obstacle detection system based on a fisheye camera, Proc. of APSIPA ASC, (2012) 1.
- 4) T. Sato et al.: Spatio-temporal bird's-eye view images using multiple fisheye cameras, Proc. of SII, (2013) 753.
- 5) C. M. Huang et al.: Fisheye cameras calibration for vehicle around view monitoring system, Proc. of ICCE-TW, (2014) 225.
- 6) S. Abraham et al.: Fish-eye stereo calibration and epipolar rectification, Journal of ISPRS, **59**, 5, (2005) 278.
- 7) J. Moreau et al.: Equisolid fisheye stereovision calibration and point cloud computation, Proc. of ISPRS, **XL-7/W2**, (2013) 167.
- 8) C. Hane et al.: Real-time direct dense matching on fisheye images using plane-sweeping stereo, Proc. of 3DV, **1**, (2014) 57.
- 9) N. Krombach et al.: Evaluation of stereo algorithms for obstacle detection with fisheye lenses, Proc. of ISPRS, **II-1/W1**, (2015).
- 10) 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).
- 11) S. K. Gehrig: Large-field-of-view stereo for automotive applications, Proc. of OmniVis, **1**, (2005).
- 12) D. Kim et al.: Rear obstacle detection system with fisheye stereo camera using HCT, Journal of Expert Systems with Applications, **42**, 17, (2015) 6295.
- 13) A. Ohashi et al.: Fisheye stereo camera using equirectangular images, Proc. of MECHATRONICS-REM, (2016).
- 14) D. Scaramuzza et al.: A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras, Proc. of IROS, (2006).
- 15) A. Fusiello et al.: A compact algorithm for rectification of stereo pairs, Proc. of Machine Vision and Applications, (2000) 16.
- 16) R. I. Hartley: Theory and Practice of Projective Rectification, Journal of Computer Vision, (1999) 115.
- 17) D. Nister: An efficient solution to the five-point relative pose problem, Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **26**, 6, (2004) 756.
- 18) P. F. Alcantarilla et al.: Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces, Proc. of British Machine Vision Conference, (2013) 13.1.