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

Construction of a fish-eye stereo camera using conversion to equirectangular images

大橋	明(中央大)		田中	祐輝 (中央大)
増山	岳人(中央大)	正	梅田	和昇 (中央大)
福田	大輔 (クラリオン)		入江	耕太 (日立オートモティブシステムズ)
緒方	健人 (クラリオン)		成田	達郎 (クラリオン)
内田	吉孝 (クラリオン)			·

Akira OHASHI, Chuo University, ohashi@sensor.mech.chuo-u.ac.jp Yuki TANAKA, Chuo University Gakuto MASUYAMA, Chuo University Kazunori UMEDA, Chuo University Daisuke FUKUDA, Clarion Kota IRIE, Hitachi Automotive Systems Takehito OGATA, Clarion Tatsuro NARITA, Clarion Yoshitaka UCHIDA, Clarion

This paper proposes a stereo camera using two fish-eye cameras. The measurement range of the stereo camera is increased by using fish-eye cameras. Fish-eye images are deformed by using an equirectangular projection to simplify the stereo correspondence search in the images. Affine transformation is applied to images so that feature points of far objects coincide in images of two cameras, in order to remove the mismatches due to the errores of intrinsic and extrinsic parameters. The corresponding points are calculated by using the stereo matching in the deformed image, and the distance is measured from the disparity. The distance measurement accuracy of the constructed stereo camera is evaluated by experiments.

Key Words: Stereo, Range image, Fish-eye camera

1 序論

近年、車においてドライバの運転支援を目的としたビュー用カ メラや3次元計測用センサの装着率が増加している.しかし,搭 載するセンサの量に比例してコストが増加するため、1つのセン サで広範囲の環境情報を取得できることが望ましい. そこで本論 文では、魚眼カメラに注目する. 魚眼カメラは 180 度以上の画角 をもつ広角カメラであり、比較的小型であるため車やロボットに 搭載しやすい特徴を持っている.本論文では,車載用3次元計測 用センサとして実際に使用されているステレオカメラに魚眼カメ ラを適用することで、魚眼ステレオカメラを構築する. 魚眼ステ レオカメラはビュー用カメラとしても3次元計測用センサとして も用いることができるため、コストを削減することができる. 魚 眼ステレオカメラを用いた関連研究としては、地上での魚眼ステ レオカメラに基づく3次元計測手法[1],水中での魚眼ステレオ カメラに基づく3次元計測手法 [2] などが提案されている.しか し,計測対象が大きく歪む画像周辺部における結果を論じる研究 は少ない.本論文では、魚眼ステレオカメラに正距円筒面投影を 適用することで周辺部を含む画像全体でステレオマッチングを簡 易かつ高精度に実現し、複数のセンサを用いずに広範囲の3次元 計測の実現を目指す.また,提案手法の有効性を実験により検討 する.

2 魚眼カメラの概要

2.1 魚眼カメラモデル[3]

多くの魚眼レンズの射影方式は,画面の中心からの距離と角度が比例する等距離射影を用いられる.等距離射影は画像中心からの距離を y,焦点距離を f,入射角を θ としたとき,式(1)で表せる.

$$y = f\theta \tag{1}$$

しかし,実際の魚眼カメラでは理想的な射影方式に厳密には従わな いため,式(1)は実用的ではない.そこで本論文では,Scaramuzza ら [3] が提案するカメラモデルを用いて内部パラメータを算出す る.カメラモデルの概略を Fig.1 に示す.ある 3 次元ベクトル $P = [X Y Z]^T$ と画像座標 $p = [u v]^T$ の対応関係は式(2)のよ うに表される.

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ f(\rho) \end{bmatrix}$$
(2)

≈ は同次座標として等しいことを表す. ここで, $\rho = \sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2}$ は画像座標 $\mathbf{p} = [u \ v]^T$ の画像中心 $\mathbf{p}_0 = [u_0 \ v_0]^T$ からの距離である. $f(\rho)$ は ρ の多項式であり, 式 (3) のように表される.

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4 + \cdots$$
(3)

本論文では、4次の項までの係数 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 をカメラの内 部パラメータとする.以上より、カメラの内部パラメータ I は 式 (4) となる.

$$\boldsymbol{I} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & u_0 & v_0 \end{bmatrix}^T \tag{4}$$

2.2 円筒面投影モデル

魚眼画像を用いるときに問題となるのが特有の歪みである.こ の歪みのために魚眼カメラは通常のステレオカメラと同様のステ レオマッチングを行うことができない.透視投影変換を用いるこ とによって歪みを除去することで,魚眼画像を一般的なカメラに よる画像と同様の画像に変換することができるが, Fig.2 に示す



Fig.3 変換に用いる魚眼カメラモデル



Fig.1 内部パラメータ推定に用いる魚眼カメラモデル



Fig.2 透視投影変換による引き伸ばし

ように画像の中心が縮小され,画像の周辺部が引き伸ばされた画 像になってしまう.なお,Fig.2(a)は画角が180[deg]の魚眼カメ ラで撮影したが,撮像素子が魚眼レンズに対して小さいために画 像の一部が欠けている.また,Fig.2(b)はFig.2(a)を透視投影 変換した結果で,水平画角が160[deg],垂直画角が120[deg]の 画像に変換している.画像が縮小されたり,引き伸ばされている 場合,その部分の情報は精度が悪くなり,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.そこで,魚眼画像から実 用上問題ない程度に歪みを取り除き,かつ,引き伸ばしを抑える 投影法として,本論文では正距円筒面投影を用いる.正距円筒面 投影は魚眼画像中の方位角と仰角に対して均等に画像を分割する 投影を行うため,魚眼画像を無理なく変形でき,かつ,歪みの少 ない画像を作成することができる.正距円筒面投影の手順を以下 に示す.

(1) 作成する画像の画素の選択

正距円筒面投影により生成される画像 (正距円筒面画像) を Fig. 3(a) に示す. 正距円筒面画像の画素数を M×N とする. 注目位置 $p' = [u' v']^T$ に対応する魚眼画像の位置を求める.

(2) 注目位置の円筒面モデルへの投影

次に、注目位置を Fig. 3(b) に示す円筒面モデルに投影する.円筒面モデルは魚眼の中心からの方位角 λ と仰角 ϕ をそれぞれ、横軸、縦軸にとったモデルである.なお、このモデルでは M が π に対応するように、また、アスペクト比は 1:1 になるように設定する.このとき、円筒面投影画像の注目位置 p' と円筒面モデル

に投影された注目位置 $q' = [\lambda, \phi]^T$ の関係は次式で表される.

$$\lambda = \frac{\pi}{M} (u' - \frac{M}{2}) \tag{5}$$

$$\phi = -\frac{\pi}{M}(v' - \frac{N}{2}) \tag{6}$$

(3) 注目位置の極座標への変換

次に、円筒面モデルに投影された注目位置を、Fig. 3(c) の極座 標に変換する. この極座標は、長さを原点から点 q までの線分と Z 軸のなす角 θ ,角度を方位角 α にとった座標である. 円筒面 モデルに投影された注目位置 q' と極座標に変換された注目位置 $q = [\theta, \alpha]^T$ との関係は次式より次式で表される.

$$\theta = \cos^{-1}(\cos\phi\cos\lambda) \tag{7}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\tan \phi}{\sin \lambda} \tag{8}$$

(4) 注目位置の実際の魚眼画像への投影

最後に,極座標に変換された注目位置を,Fig. 3(d) に示す実際 の魚眼画像に投影し,画素情報を取得する.極座標に変換された 注目位置 q' と実際の魚眼画像の注目位置 $p = [u, v]^T$ との関係 は式 (7), (8) より次式で表される.

$$u = \rho \cos \alpha + u_0 = \rho \frac{\sin \lambda}{\sqrt{\tan^2 \phi + \sin^2 \lambda}} + u_0 \tag{9}$$

$$v = \rho \sin \alpha + v_0 = \rho \frac{\tan \phi}{\sqrt{\tan^2 \phi + \sin^2 \lambda}} + v_0 \tag{10}$$

ρは,内部パラメータを用いて,次式からρについての4次方 程式の実数解を求めることによって得られる.

$$a_0 + (a_1 + \frac{1}{\tan \theta})\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4 = 0 \qquad (11)$$

(1)~(4)の処理を正距円筒面画像の全画素に対して繰り返す.

3 距離計測手法

本論文では,魚眼カメラを左右に配置した2眼の平行ステレ オに提案手法を適用することで3次元計測を行う.この章では, 左右のカメラの画像の補正や対応点探索手法,距離算出手法につ いて述べる.

3.1 アフィン変換による画像の合わせ込み

正距円筒面投影変換を行った際に、カメラキャリブレーション の誤差や左右のカメラ間の外部パラメータの誤差などによって、 左右の画像の対応に不一致が残る.この不一致を修正するために、 アフィン変換による画像の位置合わせを行う.方法としては、以 下の手順で行う.

(1) 正距円筒面画像の特徴点の抽出

+分遠方の対象を撮像した正距円筒面画像から Fig.4 に示すよう に特徴点を抽出し,それらの点の位置が左右の画像で一致するよ うにアフィン変換を行う.特徴点の抽出及びマッチングには KLT 法を用いる.なお,正距円筒面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,カメラを回転させることによって遠方の 対象の画像中の位置を調整して撮影し,特徴点を抽出することに よって,正距円筒面画像全体に対して特徴点の対応が得られるよ うにする.

(2)対応点の誤マッチングの除去

魚眼カメラの画角は極めて広いため,通常は遠方の対象ではない 対応点が存在する.また,誤マッチングによる外れ値も存在する と考えられる.そこで,Fig.4に示すように計算に用いる対応点 を手動で選択することで誤マッチングの除去を行う.

(3) 対応点によるパラメータの算出

無限遠点を撮影したときに、2つのカメラの画像上の位置は一致 するはずである.そこで、得られた遠方の対象の対応点が一致 するようにアフィン変換を行うことによってカメラキャリブレー ションの誤差や左右間のカメラの外部パラメータの誤差などの影 響を打ち消す.



Fig.4 特徴点の抽出とマッチング範囲の限定

3.2 正距円筒面画像におけるステレオマッチング

透視投影による画像のエピポーラ線は水平な直線となる.一方, 正距円筒面画像は曲線となる.方位角が0の時の仰角を ϕ_0 とすると,正距円筒面画像のエピポーラ線は次式で表せる.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\tan \phi_0 \cos \lambda \right) \tag{12}$$

この式を Fig.5 に示す.ステレオマッチングの際にはこの曲線 上を探索すれば良い.実際の正距円筒面画像でのエピポーラ線 を Fig.6(a) に示す.カメラのレンズ中心が左にずれているため, Fig.6(a) のエピポーラ線は左にずれている.全探索領域を式 (12) で算出すると計算コストが大きいため,近似として, Fig.6(b) に 示すように,注目点に対するエピポーラ線の接線上を探索する. 注目点におけるエピポーラ線の接線の傾きは次式で表される.





Fig.5 正距円筒面画像におけるエピポーラ線



Fig.6 正距円筒面画像でのステレオマッチング

3.3 正距円筒面画像における距離計算

魚眼画像を正距円筒面画像に変換すると、方位角のコサインに 反比例して視差が小さくなり、仰角のコサインに比例して視差が 大きくなる. 基線長を b、焦点距離を f、画素サイズを S、横方 向の視差を Δu とすると、カメラから対象物までのユークリッド 距離 D は次式で表せる.

$$D = \frac{bf}{S\Delta u} \frac{\cos\phi}{\cos\lambda} \tag{14}$$

式(14)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.

4 3次元環境計測実験

4.1 実験条件

構築した魚眼ステレオカメラの外観を Fig.7 に示す. CCD カメ ラに Point Grey Research 社の Flea3, 魚眼レンズにスペース社 の TV1634M を用いている. CCD の画素数は 1280 × 960[pixel], 画素サイズは 3.63[µm], レンズの焦点距離は 1.6[mm] である. 基 線長は 42[mm] になるように設定した.また,距離計測範囲は水 平方向が 155[deg], 垂直方向が 120[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. 魚眼カメラの内 部パラメータは Matlab の OcamCalib Toolbox[3] を利用して求 めた. その結果を Table 1 に示す. 対応点探索にはテンプレート マッチングを用い,類似度の評価は SAD で行った. この魚眼ステ レオカメラを用いて,提案手法により距離計測実験を行った.計 測対象を置く位置を魚眼ステレオカメラの正面と左右に 75[deg], 上下に 60[deg], さらに, 斜め方向を加えた 9 点とする. 実験環境 と計測位置を Fig.8 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.

Table 1 内部パラメータ						
	左カメラ	右カメラ				
a_0	-4.649×10^{2}	-4.695×10^2				
a_1	0.000	0.000				
a_2	9.382×10^{-4}	9.183×10^{-4}				
a_3	-8.460×10^{-7}	-7.764×10^{-7}				
a_4	1.374×10^{-9}	1.263×10^{-9}				
u_0	6.611×10^2	6.572×10^2				
v ₀	4.282×10^{2}	5.227×10^{2}				

4.2 実験結果

Fig.9 は両カメラの魚眼画像, Fig.10 は両カメラの正距円筒面 画像, Fig.11(a) は左右の正距円筒面画像から作成した視差画像 である. Fig.11(a) は赤から青の色が視差の大小に対応している. Fig.11(b) は Fig.11(a) に式 (16) を適用し作成した距離画像であ る. Fig.11(b) は赤から青の色が 0.3~9m に対応している.また, Fig.12 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誤差の絶対値で表したグラフであり,注目点 の周囲 25 点の平均をとった結果を 3 回計測した平均値から絶対 値誤差を算出した.



Fig.7 魚眼ステレオカメラの外観



Fig.8 実験環境



(a) 左画像



(b) 右画像

Fig.9 実験環境を撮像した魚眼画像



(a) 左画像



Fig.10 実験環境を撮像した正距円筒面画像



(a) 視差画像



(b) 距離画像

Fig.11 計測結果

4.3 実験結果の考察

Fig.11 より,多少の誤マッチングは見受けられるものの,全 計測範囲で距離計測ができていることがわかる. 誤マッチングが 起こっている部分としては,照明によって明るさムラができてい



Fig.12 真値と計測値の絶対値誤差のグラフ



Fig.13 誤差を 5%に抑えるために必要な視差の許容誤差

る部分や実空間で対象物が水平に伸びる部分,すなわち,正距円 筒面画像上でのエピポーラ線上に対象物が伸びる部分が挙げられ る.これらの誤マッチングは類似度の評価に SAD を使っている 以上避けられない問題であるため,今後はその部分を除外する必 要があると考えられる.また,距離計測精度は,Fig.11 を見る と斜め方向の距離計測誤差が10%以内に収まっていることが分かる. 斜め方向の距離計測誤差が大きい理由としては,カメラのキャリ ブレーションやアフィン変換による位置合わせの精度が悪いこと が考えられる.また,基線長がや焦点距離が通常のステレオカメ ラと比べて短いために誤差が距離計測精度に与える影響が大きい ことも考えられる.本論文の実験条件において,距離計測誤差を 5%に抑えるために許容される視差の誤差を Fig.13 に示す.

5 結論と展望

本論文では,魚眼カメラから得られた画像に正距円筒面投影を 行い,ステレオマッチングを簡単化する手法を提案した.正距円 筒面画像を用いた平行ステレオによる3次元計測を行う手法を提 案し,実装を行った.距離計測精度の評価実験を行い,本手法の 距離計測精度を評価した.

今後の展望としては、カメラのキャリブレーションやアフィン 変換による位置合わせの精度を向上させることによって距離計測 精度の高精度化を目指す.また、誤マッチングが起こりやすい部 分を事前に除去することによって距離計測精度の安定化を目指す.

References

- [1] Jun'ichi Yamaguchi, "Three Dimensional Measurement Using Fisheye Stereo Vision", Intech, 2011.
- [2] 成瀬 達哉,山下 淳,金子 透,小林 祐一,"魚眼ステレオカメラ を用いた水中物体の3次元計測",精密工学会誌, Vol.79, No.4, pp.344-348, April 2013.
- [3] Davide Scaramuzza, Agostino Martinelli and Roland Siegwart, " A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras ", Proc. of IROS2006, pp.5695-5701, 2006.