

# 魚眼カメラを用いた EPI 解析による 3 次元環境復元

Measurement of 3D environment with a fish-eye camera based on EPI analysis

森田 徹 (中央大) 正 寺林 賢司 (中央大) 正 梅田 和昇 (中央大)

Toru MORITA, Chuo University, morita@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

Kenji TERABAYASHI, Chuo University, terabayashi@mech.chuo-u.ac.jp

Kazunori UMEDA, Chuo University, umeda@mech.chuo-u.ac.jp

In car driving support systems and mobile robots, it is important to understand three-dimensional environment widely at once. In this paper, we use a fish-eye camera as a sensor which measures environment. This camera can take a wide-range and distortional image and can be easily mounted on cars. We propose a method for reconstructing three-dimensional environment from fish-eye images based on EPI analysis. Using this method, matching of feature points is easy and stable. The effectiveness of the proposed method is verified by experiments.

*Key Words:* fish-eye lens camera, 3D measurement, EPI (Epipolar-Plane Image)

## 1. 序論

近年、自動車の運転支援システムやロボットの自律化等に関して様々な研究が行われている。これらの研究では様々な環境情報を取得することが重要である、その中でも特に 3 次元情報が有益な環境情報だと言える。外界の情報は種々のセンサにより計測するが、そのセンサシステムは安価でシンプルなものが望まれている。一度に広範囲の 3 次元情報を得る計測手法として、全方位画像列を用いた 3 次元計測手法がある [1] [2]。全方位画像を得るセンサとして、山下ら [1] は一台のカメラと曲面鏡を合わせたものを、松久ら [2] は 6 つの CCD カメラを近接したセンサ Ladybug2 を利用している。しかしこれらは特殊なセンサであり、ロボットや車への取り付け位置が拘束されてしまう問題がある。

そこで本論文では魚眼カメラに注目する。このカメラは 180 度以上の視野角を持つ超広角カメラであり、一度に一定姿勢で広範囲を観測でき、比較的小型であるため自動車やロボットに搭載しやすいという特徴を持っている。そのため自動車の搭載し俯瞰画像（自車を上方から見下ろしたような画像）を作成したり [3]、自車位置を認識するなど [4] の自動車運転支援システムや監視カメラなど様々な用途で利用されている。しかし、魚眼カメラで撮影した画像（以下「魚眼画像」と略記）には大きな歪みがあるため一般のピンホールカメラに比べて取り扱いが困難である。

本論文では、これらの歪みを考慮し、一台の魚眼カメラで取得した複数枚の魚眼画像により 3 次元環境情報を計測し復元する手法の構築をする。一台の魚眼カメラによる 3 次元環境復元手法としては光本ら [5] によって二枚の魚眼画像を用いて Structure from Motion(SFM) [6] に基づき復元する手法が提案されている。本論文では Epipolar-Plane Image(EPI) 解析 [7] を用いた手法を提案する。これは複数枚の入力画像を用いて 3 次元形状を抽出する手法である。EPI 解析ではエピポーラ拘束が一定であるため、対応点探索、特徴点間の接続の決定が容易という長所がある。EPI 解析については、これまで様々な研究が行われている [8]。しかしながら魚眼カメラを用いた手法は見あたらない。

本論文では、魚眼カメラを用いた EPI 解析によって安定的に高精度な環境復元手法の構築を目指す。

## 2. 魚眼カメラの概要

一般のピンホールカメラのモデルである透視投影モデルは、シーンからレンズへの投射線がレンズの光軸となす角  $\theta$  と、

画像上の像高 (射影点の光軸からの距離)  $r$  [pixel] を用いて次式で表せる。

$$r = \delta \tan \theta \quad (\text{透視投影モデル}) \quad (1)$$

これに対して、魚眼レンズは設計によって射影方式が異なり、代表的なものは以下の二つである。

$$r = \delta \theta \quad (\text{等距離射影}) \quad (2)$$

$$r = \delta \sin \theta \quad (\text{正射影}) \quad (3)$$

$$\delta = f/w, \quad f: \text{焦点距離 [mm]}, \quad w: \text{画素サイズ [mm]}$$

魚眼レンズの射影方式は誤差などの影響のために、理想的な射影方式には厳密には従わない。そこで本論文では、中野ら [10] の報告に従い、魚眼カメラモデルを以下のように 5 次多項式で定義する。

$$r = k_1 \theta + k_3 \theta^3 + k_5 \theta^5 \quad (4)$$

ここで  $k_1, k_3, k_5$  はカメラの内部パラメータである。さらに光軸のずれ ( $c_u, c_v$ ) を考慮すると内部パラメータ  $I$  は

$$I = [k_1 \ k_3 \ k_5 \ c_u \ c_v]^T \quad (5)$$

となる。内部パラメータの推定は、中野らの手法 [10] より推定した値を最適化する加瀬らの手法 [11] を用いる。

## 3. 魚眼カメラからの EPI 生成

魚眼画像から EPI を生成する方法について述べる。魚眼カメラは超広角なため、通常の EPI とは生成方法が少し異なる。通常の EPI はまずカメラを光軸と垂直かつ CCD に対し水平方向に一定の撮影ピッチで静止物体を撮影する。そして取得した画像を時系列に重ね、3 次元データにすることで得られる時空間画像を画像の  $x$  軸と時間軸方向に平行な平面で切断した際の断面図として取得することが出来る。

一方、魚眼画像で同様に生成した時空間画像を単純に水平面方向に切断して生成した画像では、特徴点がこの画像内に拘束されず、3 次元情報を取得できる EPI を生成することは出来ない。そこで魚眼画像から EPI を生成する際には、魚眼カメラを光軸方向に移動させ一定の撮影ピッチで撮影する。それを時系列に重ね、Fig.1 のように、魚眼画像による時空間画像を取得する。時空間画像を光軸中心を通る平面で切断することによって Fig.2 に示すような魚眼画像からの EPI を得ることができる。

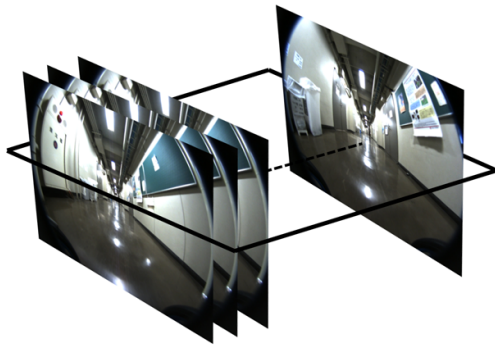


Fig.1 Spatio-Temporal Image

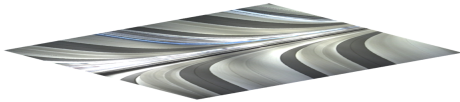
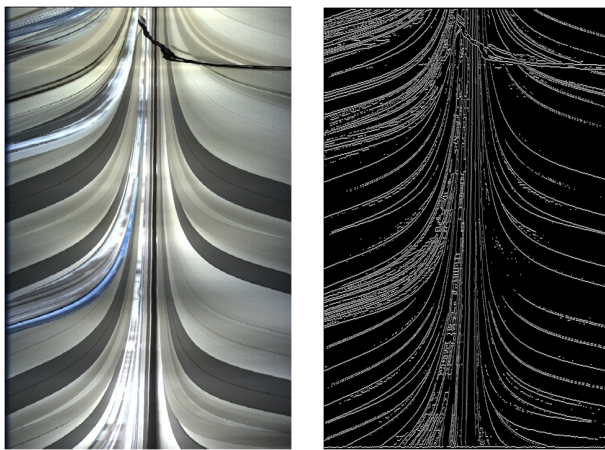


Fig.2 Epipolar-Plane Image



(a) EPI (b) Detected edge

Fig.3 Edge detection

#### 4. EPI 解析手法概要

本論文では、一台の魚眼カメラにより取得した魚眼画像から生成した EPI を用いて計測対象の 3 次元形状復元を行う [12] [13]。処理の手順を以下に示す。

まず EPI からエッジ検出を行う。検出したエッジを局所的に直線近似しその傾きを求める。最後に求めた傾きを用いて、特徴点の 3 次元座標復元式により特徴点の 3 次元位置を推定する。

以下の章では EPI 解析を用いた具体的な 3 次元手法について、6 章では本手法の誤差モデルの検討、7 章では環境復元事件について述べる。

#### 5. 3 次元計測手法

##### 5.1 エッジ検出

Canny [14] のエッジ検出アルゴリズムを使って、EPI からエッジを検出する。出力されるエッジ画像は 2 値化画像である。Canny オペレータの閾値は、5 と 10 であり、標準偏差は 0.95 を使用してエッジを検出する。結果として、Fig.3(a) から Fig.3(b) にしめすエッジの軌跡を検出することが出来る。

##### 5.2 特徴点の軌跡の傾き算出

エッジ検出を行った EPI 上における特徴点の軌跡の傾きを求める。Fig.4 に示す任意の点  $p = [u, n]^T$  における傾きを

求めるとき、 $n \pm \Delta n$  の範囲の曲線を最小二乗法を用いて直線近似することにより算出する。ここでの  $\Delta n$  は実験的に求めるものとする。

##### 5.3 計測点の 3 次元位置

ここでは簡単のため魚眼カメラの射影方式は、等距離射影と仮定する。シーンの座標系を Fig.5 のように設定する。視点を  $X$  軸上に取り、光軸方向を  $Z$  軸の正の方向とする。特徴点の 3 次元座標を  $P = [X, Y, Z]^T$  とする。今、 $XZ$  平面となす角度  $\phi$  で切断して生成した EPI を考える。カメラの撮影ピッチは  $d_z$  で光軸方向に移動させ撮影するものとする。このとき、点  $P$  の  $XZ$  平面への投影点  $P'$  と原点のなす角度  $\theta$  は以下のように表せる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{Z} \quad (6)$$

ここで  $n$  番目の撮影位置と  $P'$  のなす角度  $\theta_n$  を考えると、 $\theta_n$  は

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{X}{Z - d_z n} \quad (7)$$

となる。式 (7) を式 (2) に代入することで、 $Z$  の座標値が以下のように求まる。

$$Z = \frac{X}{\tan \frac{\delta}{r}} + d_z n \quad (8)$$

ここで EPI 上での特徴点の軌跡の任意の点  $p$  における傾き  $l$  は、Fig.4 に示す座標系で考えたとき

$$l = \frac{\partial u}{\partial n} \quad (9)$$

と求まる。ここで  $u$  は式 (8) の像高  $r$  に等しいので、以下の式が成り立つ。

$$u = \delta \tan^{-1} \frac{X}{Z - d_z n} \quad (10)$$

式 (9)、式 (10) から、式 (10) の両辺を  $n$  で偏微分して  $X$  についてまとめると  $X$  の座標値は以下の式で求まる。

$$X = \frac{\delta d_z}{l \left( \frac{1}{\tan^2 \frac{\delta}{r}} + 1 \right)} \quad (11)$$

最後に  $Y$  の座標値は

$$Y = X \tan \phi \quad (12)$$

で求まる。以上の式 (8)、(11)、(12) から、特徴点の 3 次元位置を算出する。

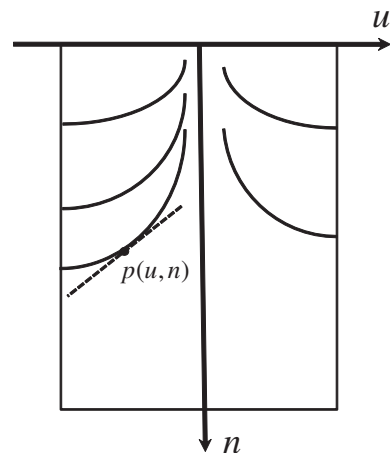


Fig.4 EPI coordinate system

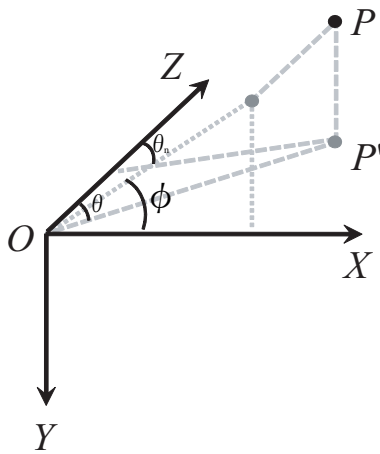


Fig.5 Coordinate system

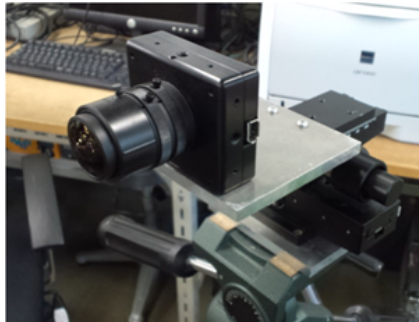


Fig.6 Experiment system

## 6. 3次元環境復元実験

### 6.1 実験環境

これまで述べた提案手法を用いて、魚眼画像から計測対象の3次元復元例について述べる。使用したカメラをFig.6に示し、計測対象はFig.7, 9に示す廊下と部屋とした。CCDカメラはPointGreyResearch社のDragonfly2, 魚眼レンズはスペース社のTV1634M(正射影)を用いた。TV1634Mの内部パラメータは実験により推定した $k_1 = 365.85$ ,  $k_3 = -13.68$ ,  $k_5 = -0.85$ ,  $c_u = 17.534$ ,  $c_v = 17.688$ を用いた。画像サイズは $1024[\text{pixel}] \times 768[\text{pixel}]$ である。

カメラの高さは一定とし、カメラは移動前のカメラの光軸方向に動かし、撮影ピッチは $\sigma_z = 10[\text{mm}]$ とした。 $\Delta n$ は実験的に求め、ここでは $\Delta n = 3$ を使用し復元を行った。

### 6.2 実験結果

部屋の実験結果をFig.8, 10に示す。それぞれ(a)と(b)は3次元計測結果の正面図と平面図を示している。図中のラインは、正面図では左右の壁と天井に相当する位置を、平面図ではFig.8(b)は左右の壁、Fig.10(b)は左右正面の壁に相当する位置を示すものである。これらを見ると計測対象の形状が概ね復元できていることがわかる。正面図ではFig.7の廊下の形状、Fig.9の左手前にあるプリンタの形状も復元できているのが分かる。Fig.7では左壁、Fig.9では床面に相当する特徴点が復元されていないのは、テクスチャが一定のため特徴点が無くEPI上でエッジが検出されないためである。

計測結果には明らかにうまく復元できていない点が存在する。これは、EPI上での特徴点軌跡の傾き算出がうまくいっていないことが原因である。傾き算出の際、EPIのエッジ検出を行った時に含まれるノイズを軌跡として傾きを求め復元してしまうからだと考えられる。今後ノイズをどう削除する

かの検討が必要である。

## 7. 結論

本論文では、魚眼カメラを用いたEPI解析による3次元環境を復元する手法を提案し、実装を行った。本手法により外界のおおよその3次元形状が復元できることを示した。

今後の展望としては、テクスチャを用いた3次元モデルの生成をする。また、検討した誤差モデルを用いて提案手法の定量的な精度評価を行い、他の手法との精度比較を行う。

## 参考文献

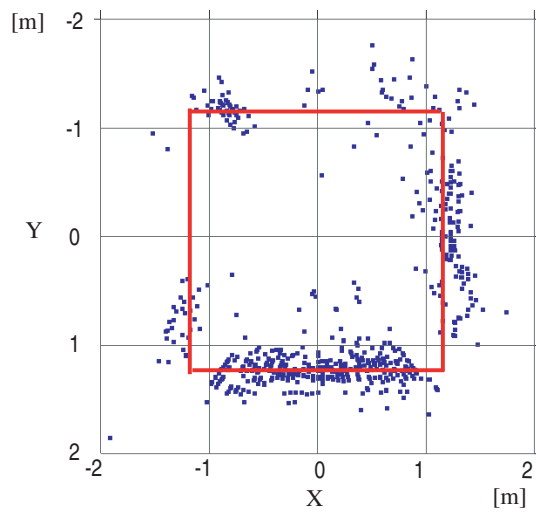
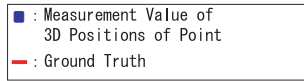
- [1] 山下 淳, 原田 知明, 金子 透: “全方位カメラ搭載移動ロボットによる Structure from Motion を用いた 3次元環境モデリング”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.73, No.726, pp.512-519, 2007.
- [2] 松久亮太, 川崎洋, 小野晋太郎, 阪野貴彦, 池内克史: “因子分解法とバンドル調整による全方位画像列からの形状および位置姿勢の同時推定手法”, 第11回画像の認識・理解シンポジウム MIRU 2008, IS5-36, 2008.
- [3] 鈴木政康, 知野見聡, 高野照久: “俯瞰ビューシステムの開発”, 自動車技術学会学術講演会前刷集, 116-07, pp.17-22, 2007.
- [4] 滝本周平, 伊藤崇晶: “車載カメラを用いた単眼測距検証システムの開発”, SEI テクニカルレビュー, Vol. 169, pp. 82-87, 2006.
- [5] 光本尚訓, 寺林賢司, 新垣洋平, 下村倫子, 梅田和昇: “魚眼カメラを用いた Structure From Motion による 3D 環境計測”, 第14回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.71-76, 2009.
- [6] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: “コンピュータービジョン”, 新技術コミュニケーションズ, 1999.
- [7] R.C.Bolles, H.H.Baker and D.H.Marimont, “Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion,” Int 'l J. Compute Vision, Vol.1, pp.7-55, 1987.
- [8] H. Kawasaki, K. Ikeuchi, M. Sakauchi, “Spatio-Temporal Analysis of Omni Image,” IEEE International Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.II, No.6, pp.577-584, 2000.
- [9] 中川雅朗, 斎藤英雄, 小沢慎治, “ハンディカメラを用いて撮影された画像列からの EPI の補正に基づく室内環境 3次元再構築”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II No.2 pp.266-275, 2001.
- [10] 中野誠士, 李仕剛, 千葉則茂: “球面画像獲得のための魚眼カメラの校正”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J88-D-II, No.9, pp.1847-1856, 2005.
- [11] 加瀬翔太, 光本尚訓, 新垣洋平, 下村倫子, 梅田和昇: “複数の魚眼カメラを用いた俯瞰画像生成手法の構築”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 1A1-G23, 2008.
- [12] H. Baker and R.C.Bolles, “Generalizing Epipolar Plane Image Analysis on the Spatiotemporal Surface,” Int 'l J. Computer Vision, Vol.3, pp.33-49, 1989.
- [13] 山本正信, “連続ステレオ画像からの 3次元情報の抽出”, 電子通信学会論文誌 (D), Vol. J69-D, No.11, pp.1631-1638, 1986.
- [14] J. Canny, “A Computational Approach to Edge Detection,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, No.6, pp.679-698, 1986.



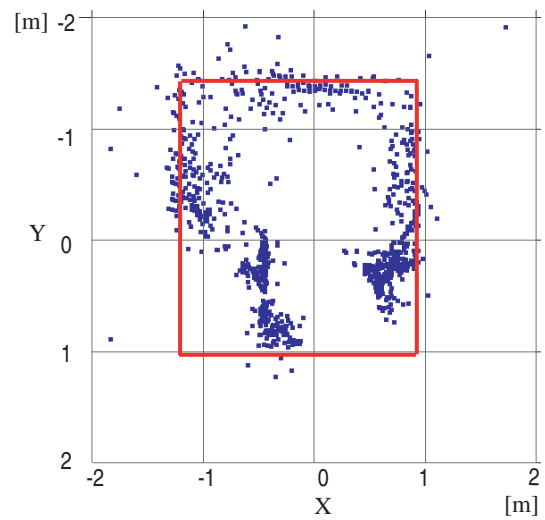
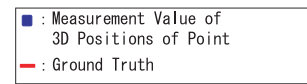
Fig.7 Measurement Scene 1



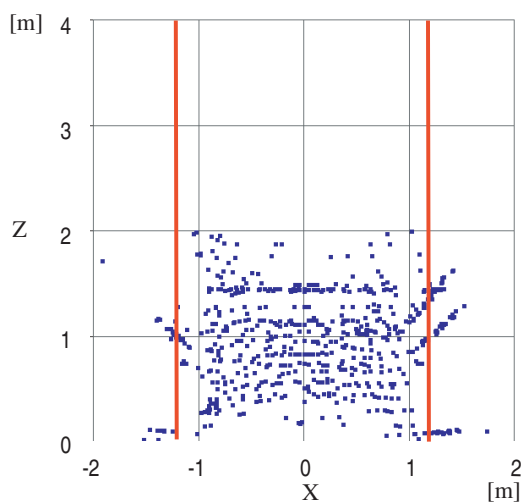
Fig.9 Measurement Scene 2



(a) Front view (X-Y)

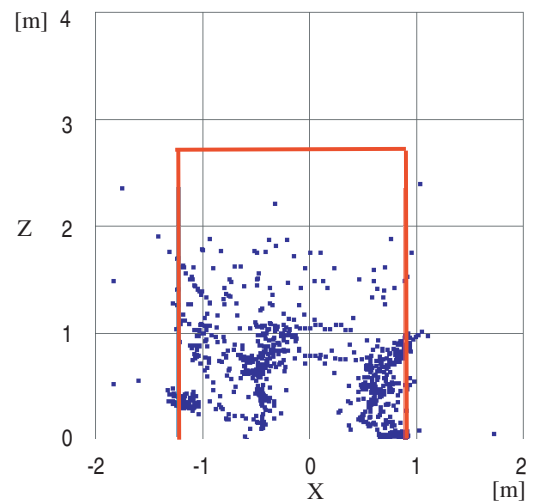


(a) Front view (X-Y)



(b) Top view (X-Z)

Fig.8 3D reconstruction result 1



(b) Top view (X-Z)

Fig.10 3D reconstruction result 2