

魚眼カメラを用いた EPI 解析による 3 次元環境復元の精度検証

岡本 寛也[†] 寺林 賢司[‡] 梅田 和昇[†]

[†]中央大学大学院理工学研究科 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

[‡]静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: [†]okamoto@sensor.mech.chuo-u.ac.jp, [‡]tera@eng.shizuoka.ac.jp

[†]umeda@mech.chuo-u.ac.jp

あらまし 自動車の運転支援システムやロボットにおいて、一度に広範囲を 3 次元計測することが重要である。本論文では、3 次元計測を行うセンサとして魚眼カメラを用いる。魚眼カメラで取得した画像は大きく歪んでいるが、一度に広範囲を観測でき、自動車等への搭載が容易である。我々は、魚眼カメラを用いた EPI 解析による 3 次元環境復元手法を提案している。本手法を用いることで、特徴点の対応を容易かつ安定に行える。本論文では、精度検証実験により本手法の有効性を検証する。

キーワード 魚眼カメラ, 3 次元計測, Epipolar-Plane Image (EPI)

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り、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。3 次元情報は種々のセンサにより計測されるが、そのセンサは安価でシンプルなものが望まれる。

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 度以上の超広角の視野角を持つカメラであり、一度に一定姿勢で広範囲を観測できる。また、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。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、一般のカメラに比べて取り扱いが困難である。

我々は Epipolar-Plane Image(EPI)解析[1]を用いて複数枚の魚眼画像により 3 次元環境情報を計測する手法を提案している[2][3]。この手法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であるという長所がある。

本論文では、3 次元計測の精度検証実験を行い、提案手法の有効性を示す。

2. 魚眼カメラの概要

一般のピンホールカメラモデルでは、計測点からレンズへの投射方向はレンズの光軸となす角 $\theta[\text{rad}]$ と画像上の像高(射影点の光軸からの距離) $r[\text{pixel}]$ を用いて

$$r = \delta \tan \theta \quad (1)$$

と表すことができる。ただし

$$\delta = f/w \quad (2)$$

であり、 f は焦点距離[mm]、 w は画素サイズ[mm]を表す。

一方、魚眼レンズには、いくつか射影方式がある。代表的な等距離射影では

$$r = \delta \theta \quad (3)$$

また、正射影では

$$r = \delta \sin \theta \quad (4)$$

と表される[2][3]。魚眼レンズの射影方式は製造誤差などの影響のために、理想的な射影モデルには従わない。そこで魚眼カメラモデルは次式のように射影モデルを Taylor 展開して得られる奇数次数項の近似式によって表現されることが多い。

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

ここで k_1, k_3, k_5 はカメラの内部パラメータである。さらに光軸の位置(C_u, C_v)を考慮するとカメラの内部パラメータは

$$I = [k_1 \ k_3 \ k_5 \ C_u \ C_v]^T \quad (6)$$

となる。 I は直線などの既知のパターンを観測することで推定される[4]。

3. EPI 解析による 3 次元計測手法の概要[2][3]

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 次元計測を行う。処理の手順を以下に示す。

まず、魚眼画像から EPI を生成する。次に、得られた EPI からエッジ検出を行い、EPI に含まれる計測点の軌跡を追跡する。さらに、この軌跡の時空間勾配を算出する。最後にこの勾配情報から奥行き情報を計算し 3 次元情報を得る。

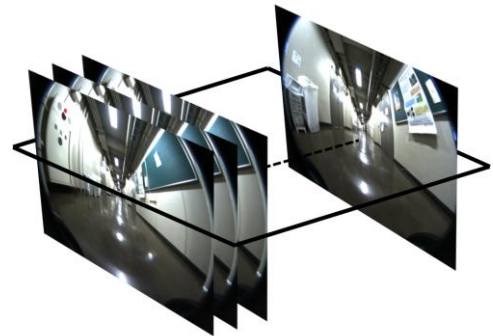


図 1 時空間画像

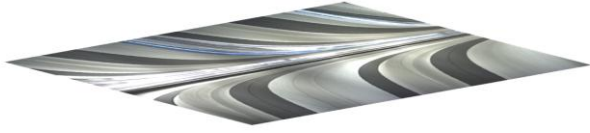


図 2 EPI

3.1. 魚眼カメラを用いた EPI の生成

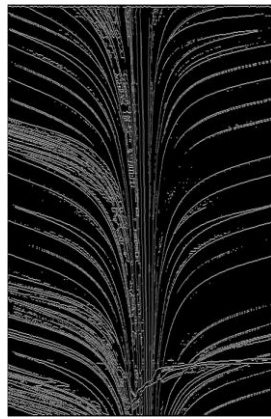
魚眼画像から EPI を生成する際には，魚眼カメラを光軸方向に移動させ，一定の撮影ピッチで撮影する．それを時系列に重ね，図 1 のように魚眼画像による時空間画像を取得する．光軸中心を通る平面で時空間画像を切断することによって図 2 のように魚眼画像から EPI を生成することができる．

3.2. 計測点の追跡

EPI のエッジを検出し，その連結情報を用いてカメラの運動により生じる計測点の時空間軌跡を追跡する．EPI のエッジ検出には，Canny のエッジ検出アルゴリズムを利用する．図 3 に EPI から検出されたエッジ画像を示す．



(a) EPI



(b) エッジ画像

図 3 Canny のエッジ検出

3.3. 時空間勾配の算出

エッジ検出より得られた EPI 上の計測点の軌跡に対して時空間勾配を算出する．EPI の座標系を図 4 のように定義する．ここで横軸 s は EPI 切断方向の画素位置を，縦軸 t は時系列で撮影された魚眼画像の番号を表す．

計測点の軌跡上の点 $p(s,t)$ の勾配

$$g = \frac{dt}{ds} \quad (7)$$

を $p(s,t)$ の $t \pm \Delta t$ の範囲に存在するエッジ検出点を用いて，主成分方向に直線近似する．

3.4. 計測点の 3 次元計測

魚眼カメラのモデルとして，式(3)で表される等距離射影を考える．3 次元空間の座標系を図 5 のように定義し，初期位置が原点 O にある魚眼カメラが Z 軸方向へ運動したときに，点 P の 3 次元位置 (x,y,z) を計測することを考える．

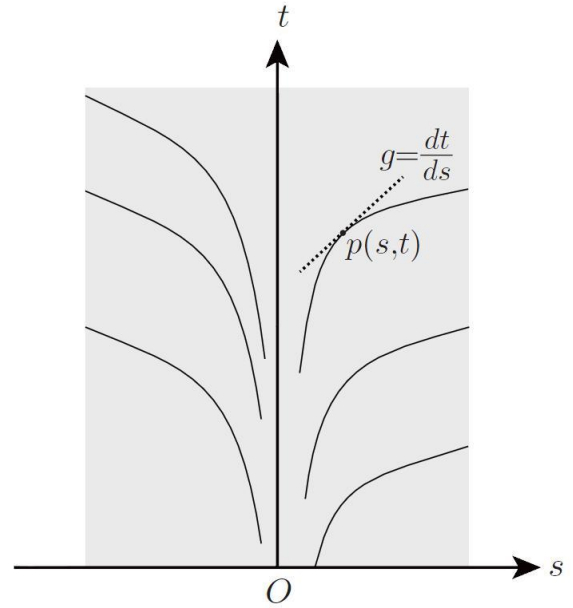


図 4 EPI の時空間勾配

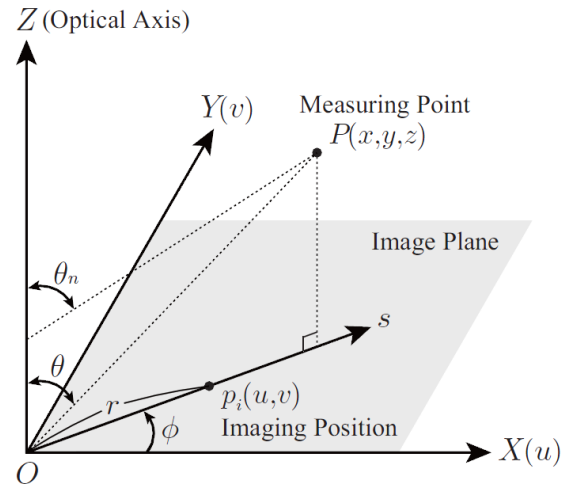


図 5 3 次元座標系

光軸 Z と OP のなす角度を計測方向 θ とすると，

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (8)$$

である．撮影間隔が d_z のとき， n 番目の撮影位置における計測方向 θ_n は，

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z - d_z n} \quad (9)$$

である．

3 次元空間の計測点 P が魚眼カメラで撮影され結像した点を p_i とし，その画像座標を (u,v) とすると，結像した点 p_i の撮像方向 ϕ は，

$$\phi = \tan^{-1} \frac{u}{v} \quad (10)$$

である．また，結像した点 P_i の像高 r は，方向 ϕ の EPI における空間軸の座標値 s に等しく

$$r = \sqrt{u^2 + v^2} = s \quad (11)$$

である．

計測点 $P(x,y,z)$ が EPI 上を描く曲線は式(3)で表される射影モデル，式(9)の計測方向 θ_n ，式(11)の像高 r の関係から

$$n = \frac{z \tan \frac{s}{\delta} - \sqrt{x^2 + y^2}}{d_z \tan \frac{s}{\delta}} \quad (12)$$

となる．また，EPI 上での時空間勾配 g は，

$$g = \frac{dn}{ds} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d_z \delta \sin^2 \frac{s}{\delta}} \quad (13)$$

である．以上をまとめると，計測点 P の 3 次元位置 (x,y,z) は，時空間勾配 g を用いて

$$x = d_z \delta g \sin^2 \frac{s}{\delta} \cos \phi \quad (14)$$

$$y = d_z \delta g \sin^2 \frac{s}{\delta} \sin \phi \quad (15)$$

$$z = d_z \left(\frac{\delta g}{2} \sin \frac{2s}{\delta} + n \right) \quad (16)$$

によって計算できる．

4. 計測精度検証実験

計測対象の位置が既知である環境における計測精度検証実験を行い，魚眼カメラを用いた EPI 解析による 3 次元計測手法の有効性を検証する．

本実験では，魚眼レンズに SPACE 社の TV1634M を，カメラに Point Grey Research 社の Dragonfly2 (1024[pixel] × 768[pixel]) を利用した．焦点距離 $f=1.6[\text{mm}]$ ，画素サイズ $w=4.65[\mu\text{m}]$ である．魚眼カメラの内部パラメータ $\delta=344$ とした．魚眼カメラは図 6 のように XY ステージ上に固定され，撮影ピッチ d_z の移動ごとに撮影した画像列から 3 次元計測を行った．

実験環境としては，魚眼カメラを搭載した自動車が進路しながら道路に面した建物を計測することを想定し，図 7 に示す環境にて計測方向 θ と計測環境のスケール d を変化させて計測を行った．具体的には，図 8 のように魚眼カメラの光軸が壁と平行となるように配置し，壁面上に配置されたストライプパターンの計測を行った．計測方向 θ は，15,30,45,60,75[deg] の 5 方向，計測環境のスケール d は，200,250,300,350,400,450,500[mm] の 7 条件とした．また，撮影ピッチは $d_z = d/50$ とした．

計測結果をスケール $d=1000[\text{mm}]$ へ変換し，ひとつの俯瞰図にまとめたものを図 9 に示す．EPI 上での勾配 g を算出するために使用した画像数は 7 とした．図 9 より， $\theta=60,75[\text{deg}]$ といった広角領域でも計測点が得られていることが確認できる．ピンホールカメラモデルで表現される一般のカメラでは広角領域の計測が困難であることから，このことは魚眼レンズを利用することの利点を示している．また， $\theta=30,45,60[\text{deg}]$ において真値に近い計測点を得られていることが分かる．

一方， $\theta=15,75[\text{deg}]$ において誤差が大きくなり， $\theta=15[\text{deg}]$ において計測点のばらつきが多いことが読み取れる．

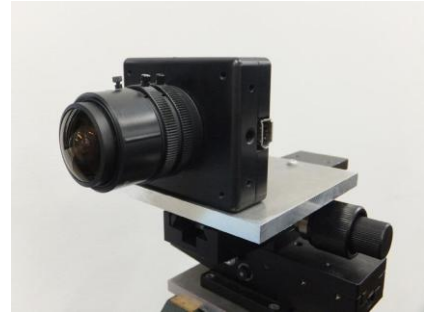


図 6 魚眼カメラ

計測方向 θ と計測方向の距離 r_θ について，計測誤差をまとめたものを図 10 に示す．横軸は計測方向 θ であり，縦軸は図 10(a)において計測方向 θ の誤差，図 10(b)において計測方向の距離 r_θ の誤差の割合である．

図 10(a)から， θ に -2[deg] 程度の偏差があり， θ が大きくなるにつれてばらつきが大きくなることが分かる．また，図 10(b)から r_θ は θ が大きくなるにつれて偏差が大きくなるが，ばらつきは小さくなることが分かる．

超広角領域において θ のばらつきが大きくなっている主要原因として，魚眼画像の周辺部において解像度が相対的に低くなっていることが考えられる．また， θ と r_θ の偏差が生じる要因としては，魚眼カメラモデルの簡略化，および，カメラの光軸が壁面方向とずれていたことが考えられる． r_θ のばらつきについては，魚眼カメラの移動方向と計測方向のなす角，および魚眼カメラからの距離が要因だと考えられる．

以上をまとめると，計測方向 θ が 30～60[deg] の広角領域まで比較的高精度に計測でき，超広角領域においても計測できるため，本手法は有効であると考えられる．

5. 結論

本論文では，魚眼カメラを用いた EPI 解析による 3 次元計測手法の有効性を精度検証実験により検証し，広角領域において 3 次元計測が可能であることを示した．

今後の課題としては，さらに長い観測画像列を利用した計測精度の向上，カメラ運動方向の制約の緩和などがあげられる．

文 献

- [1] R.C.Bolles, H.H.Baker and D.H.Marimont, "Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion," International Journal of Computer Vision, Vol.1, pp.7-55, 1987.
- [2] 森田徹，寺林賢司，梅田和昇：“魚眼カメラを用いた EPI 解析による 3 次元環境復元”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 1P1-D08, 2011.
- [3] K.Terabayashi, T.Morita, H.Okamoto and K.Umeda: "3D Measurement Using a Fish-Eye Camera Based on EPI Analysis," Journal of Robotics and Mechatronics (to be published).
- [4] 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”，精密工学会誌，Vol.75, No.2, pp.251-255, 2009.

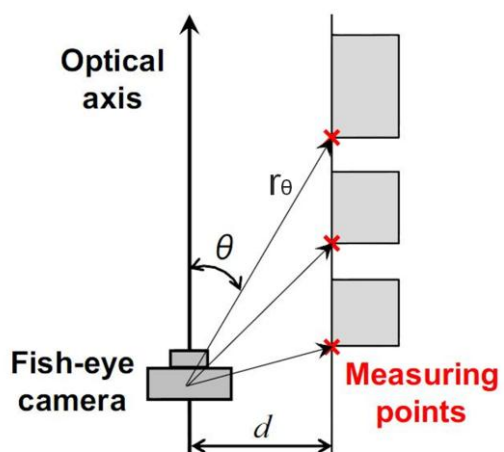


図7 計測点のレイアウト



図8 実験シーン

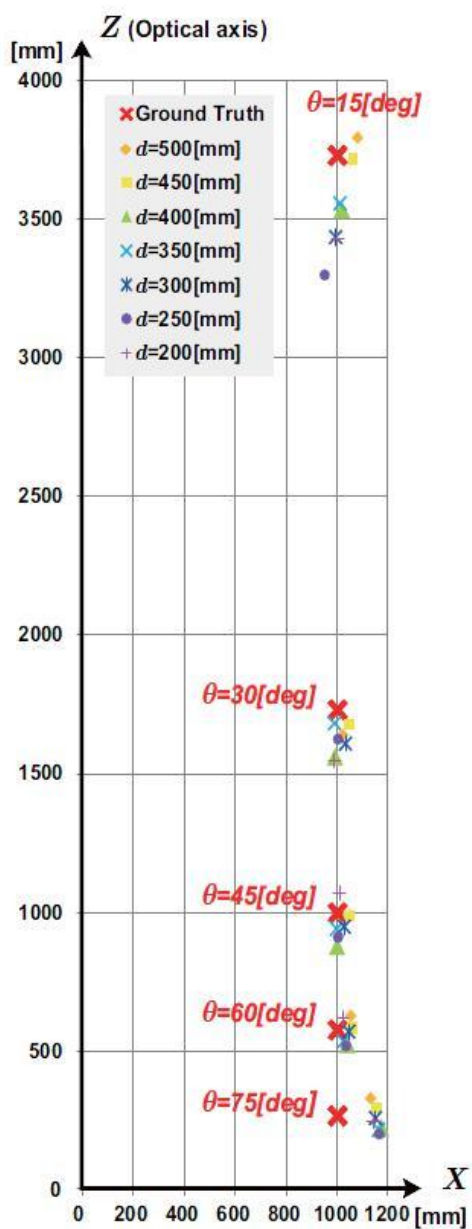
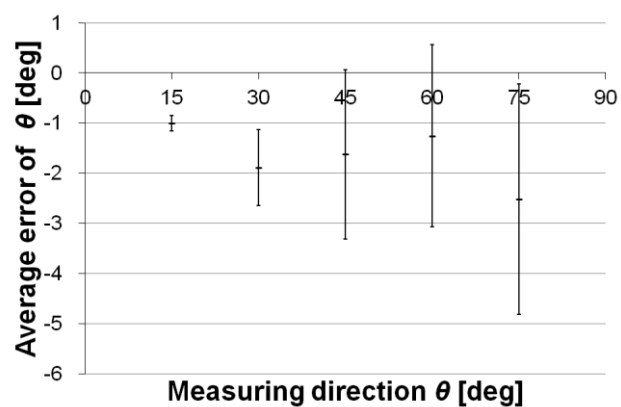
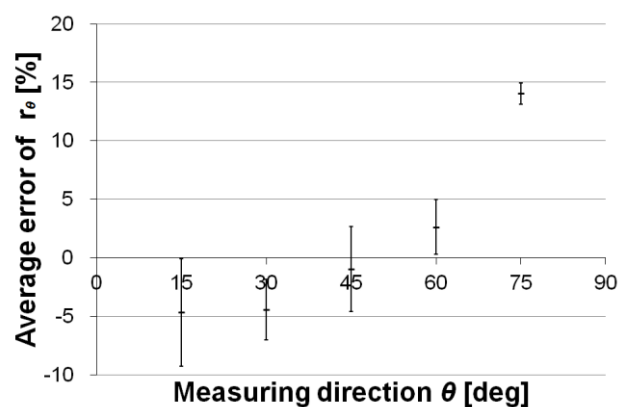


図9 計測結果



(a) θ の計測誤差



(b) r_θ の計測誤差

図10 計測誤差