

## 円周魚眼カメラのマルチベースラインステレオ法による全天3次元計測

金 珍向<sup>†</sup>, 久保 守<sup>†</sup>, 村本 健一郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 金沢大学大学院 自然科学研究科 電子情報工学専攻

本論文では、天頂角 90 度かつ全周 360 度が一度に撮影できる円周魚眼カメラを用いて、マルチベースラインステレオ法による 3 次元計測の手法を提案する。鉛直上向きの魚眼カメラを上下に昇降し、ステレオ画像対を取得する。基線長を光軸方向にとることで画像中心から放射方向にエピポーラ拘束が成立する。濃度値差の 2 乗和によるテンプレートマッチングにより対象点の天頂角と方位角を求める。複数のステレオ画像対を使ったマルチベースラインステレオ法により、偽対応点を除き正確で高精度な 3 次元座標を算出する。実際に室内実験を行い、位置精度を評価した。

## Three-dimensional measurement by multi-baseline stereo method using fisheye camera

Chinhyang KIMU<sup>†</sup> Mamoru KUBO<sup>†</sup> Ken-ichiro MURAMOTO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Kanazawa University

In this paper, we propose a 3D measurement approach by multi-baseline stereo method using fisheye camera with 180 degree field of view. In this approach, the camera is moved up and down along a perpendicular line to take pairs of stereo images. By choosing the baseline on optical axis, the epipolar constraint is formed in the radiation direction from the center of the image. Then zenith angle and azimuth angle in camera coordinate system can be calculated by template matching using the sum of squared differences of pixel values. The three dimensional coordinates are precisely calculated by applying the multi-baseline stereo method using several pairs of stereo images. Our experiment results showed the measurement accuracy of the proposed technique.

### 1 まえがき

周囲の 3 次元環境を把握するのに、これまで様々な全方位視覚システムが開発されている<sup>1)</sup>。円周魚眼カメラは、視野角が 180 度あり、天頂角 90 度かつ全周 360 度の光軸方向の半球を一度に撮影できるため、鉛直上向きに使用して上方空間を 3 次元計測するのに最適であり、移動ロボット<sup>2)</sup>などで利用されている。

本研究では、森林内で樹木の枝や葉の 3 次元情報の取得を目指し、円周魚眼レンズの 3 次元計測を提案する。現在、衛星リモートセンシングやレーザスキャナによって森林を計測する研究が行われているが、検証のために樹木の測量が不可欠である。距離計や測高棒を使って行う測量は、かなりの時間と人力が必要であり、簡易的な計測に限定される。デジタルカメラで 3 次元画像計測が効率的に実施できれば、枝や葉の 3 次元情報を網羅的に調べることも可能となる。

3 次元情報を獲得するには、異なるカメラ座標系

でのステレオ視が必要であり、本研究では光軸である鉛直方向に基線長をとる<sup>3)</sup>。画像中心から放射方向にエピポーラ拘束が成立し、濃度値差の 2 乗和によるテンプレートマッチングにより対応点探索を行う。さらに、複数のステレオ画像対を使ったマルチベースラインステレオ法<sup>4)</sup>により、偽対応点を除き正確で高精度な 3 次元座標を算出する。

以下に提案手法を述べ、室内実験の結果を示し考察する。

### 2 提案手法

本研究では、等立体角射影方式の円周魚眼カメラを用いる。以下に、魚眼投影モデル、ステレオ画像対の取得とテンプレートマッチングによる対応点探索、マルチベースラインステレオ法による 3 次元座標の算出の順に述べる。

#### 2.1 魚眼投影モデル

図 1 に世界座標系  $(X_w, Y_w, Z_w)$  におけるカメラ座標系  $(X_c, Y_c, Z_c)$  と対象点の位置関係を示す。世

世界座標系での対象点を  $P(x_p, y_p, z_p)$ , カメラの視点を  $T(T_x, T_y, T_z)$  とする. カメラ視線は鉛直上向きとし, カメラ座標系の  $Z_c$  軸を世界座標系の  $Z_w$  軸と一致させ,  $X$  軸と  $Y$  軸の方位も一致させる. つまり, 軸周りの回転(ロール, ピッチ, ヨー)はないものとし,  $Z_w = 0$  を地面にとると  $T_z$  は地面からのカメラの高さとなる. ベクトル  $PT$  が  $Z_c$  軸となす角を天頂角  $\theta (0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$  とし, ベクトル  $PT$  が  $X_c Y_c$  平面上で  $X_c$  軸となす角を方位角  $\phi (0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ)$  とすると, 単位ベクトルは

$$V = [\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta]^T \quad (1)$$

になる.

次に画像座標系  $(u, v)$  の投影面を考え, 対象点  $P(x_p, y_p, z_p)$  の投影点を  $P_i(x, y)$  とする. 本研究で使用する魚眼カメラは等立体角射影で, 投影中心  $(C_x, C_y)$  から投影点  $P_i$  までの像高  $r$ [pixel] と天頂角  $\theta$  の関係は

$$r = \sqrt{2}R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

である. ここで, 定数  $R$ [pixel] は天頂角が  $90$  度の際の像高(画像半径)である. 方位角  $\phi$  は

$$\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3)$$

である. 画像座標系を図 2 に示す.

## 2.2 ステレオ画像対の取得とテンプレートマッチングによる対応点探索

本研究では, ステレオ視の基線長を光軸方向にとる. 高さを変えて撮影した 2 枚の画像では, 投影中心から放射方向(画像半径方向)にエピソード拘束が成立する.

図 3 に概要を示す. 対象点  $P(x_p, y_p, z_p)$  を, カメラ座標系  $T_0$  と  $T_1$  で撮影したとする.  $T_1$  は  $T_0$  より基線長  $B$  だけ下方にある. このとき光軸から対象点までの水平距離は

$$D = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (4)$$

$$= \frac{B}{\frac{1}{\tan \theta_1} - \frac{1}{\tan \theta_0}} \quad (5)$$

となる. 図 3 右に示す 2 枚の画像対での対応点  $p_0$

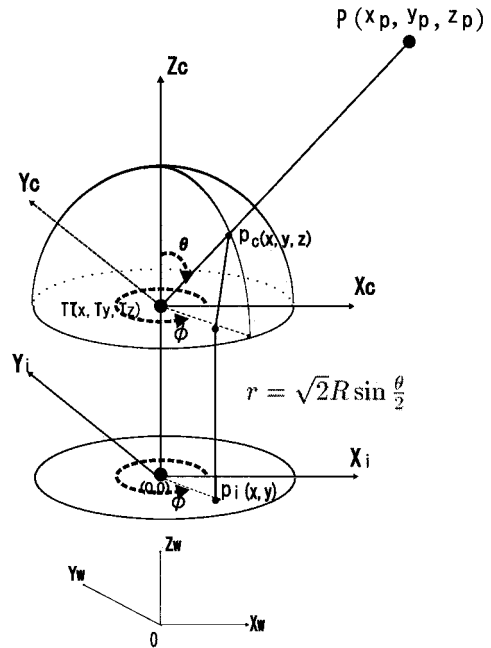


図 1 魚眼投影モデル:世界座標系とカメラ座標系

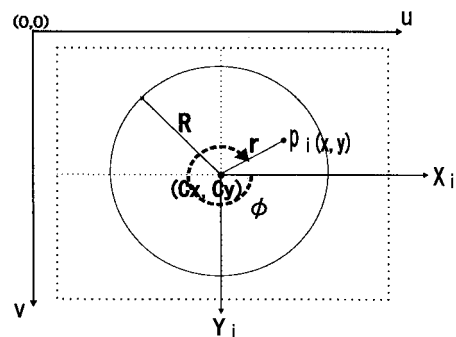


図 2 画像座標系

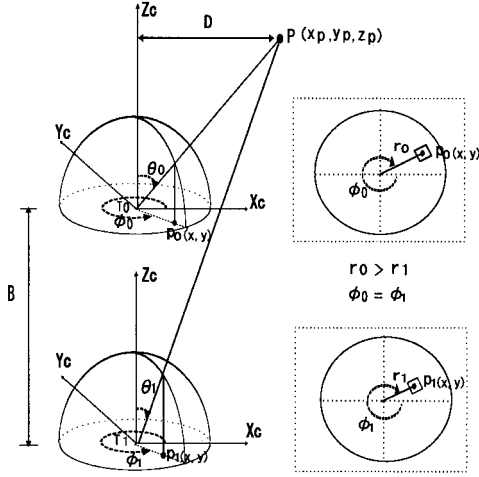


図3 ステレオ視と対応点探索

と  $p_1$  には以下の関係が成り立つ.

$$\phi_0 = \phi_1 \quad (6)$$

$$r_0 > r_1 \quad (7)$$

$$\Delta r = r_0 - r_1 \quad (8)$$

$$= \sqrt{2}R \left( \sin \frac{\theta_0}{2} - \sin \frac{\theta_1}{2} \right) \quad (9)$$

外部パラメータに誤差がないとすれば、対応点の探索を画像半径方向に沿って、 $0 < r_1 < r_0$  の範囲で探索すればよい.

本研究では取得したステレオ画像対をグレースケースに変換し、次式を評価式としてテンプレートマッチングを行う.

$$SSD(r, \phi; \Delta r) = \sum_{r, \phi \in W} \{f_0(r, \phi) - f_1(r - \Delta r, \phi)\}^2 \quad (10)$$

ここで、カメラ座標系  $T_0, T_1$  の画像濃度値をそれぞれ  $f_0, f_1$  とする. 注目画素  $(r_0, \theta_0)$  に対してテンプレートとなる領域  $W$  を設定し、その領域内における濃度値差の2乗和  $SSD$  を求める.  $0 < r_1 < r_0$  の範囲で  $SSD$  が最小となる  $\Delta r$  が対応画素  $(r_1, \theta_1)$  である.  $(r_0, \theta_0)$  と  $(r_1, \theta_1)$  より、2つの直線  $PT_0$  と  $PT_1$  が定まり、その交点が対象点  $P$  の3次元座標である.

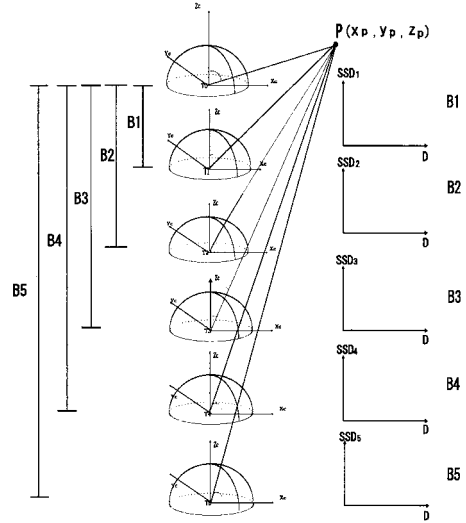


図4 マルチベースラインステレオ法

### 2.3 マルチベースラインステレオ法による3次元情報の獲得

ステレオ視では基線長が長いほど得られる3次元座標の精度が高くなるが、評価式の極小点が複数できる偽対応の問題が生じやすい. 基線長が短くなると極小値が少なく偽対応の問題がなくなるが、得られる3次元座標の分解能が悪くなる. そこで、複数のステレオ画像対を用いるマルチベースラインステレオ法により偽対応点を除き正確で高精度な3次元座標を算出する. 概要を図4に示す. カメラ座標系の高さのみを変え、その他の外部パラメータを同一にして複数枚の画像を取得する. 各基線長  $B_i$  のステレオ画像対についてテンプレートマッチングを行い、 $SSD_i$  を求める. 水平距離  $D$  に対して  $SSSD = \sum_i SSD_i$  を求め、その最小値から3次元座標を確定する.

### 3 実験結果

図5に、魚眼カメラの外観を示す. 本研究で使用したカメラはキャノン EOS 5D (画像サイズ 4368 × 2912 pixel), 魚眼レンズはシグマ 8mm F3.5 EX DG CIRCULAR FISHEYE である.

魚眼カメラは、水準器を見ながら三脚を調整して、光軸を鉛直方向に設定した. カメラの高さ調整は目盛付きのセンターポールを昇降して行い、高さ以外の外部パラメータが変わらないようにした.



図5 魚眼カメラ

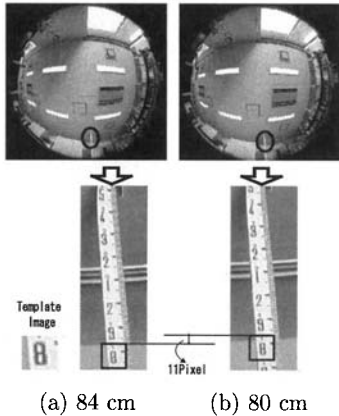


図6 テンプレートの探索結果

最も高い位置 (84 cm) を基準に、基線長  $B = 4$  cm として、84, 80, 76, 72, 68, 64 cm の 6 枚を撮影した。

84 cm と 80 cm の画像対 (基線長  $B_1$ ) を図 6 に示す。下図が対応点探索に使用したテンプレートで  $21 \times 21$  pixel とした。テンプレートは画像半径に対して扇形に設定し、半径とともに拡大・縮小するのが理想的であるが、ここでは矩形領域とした。

また、光軸の傾きや軸周りの回転などの外部パラメータの誤差を考慮して、探索範囲を画像半径方向に対して円周方向に幅をもたせ、その中の最小値を画像半径に対する  $SSD$  とした。さらに、対応点から 2 本の直線の交点を求める際に、ねじれが生じている場合には、2 本の直線の距離が最小となる各直線上の点を求め、その中点を交点の代わりとした<sup>5)</sup>。

各基線長を上から  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$  とし、各ステレオ対ごとに  $D$  と  $SSD$  の関係を求めた。 $B_1, B_2, B_5$  の場合を図 7, 8, 9 に示す。基線長が短

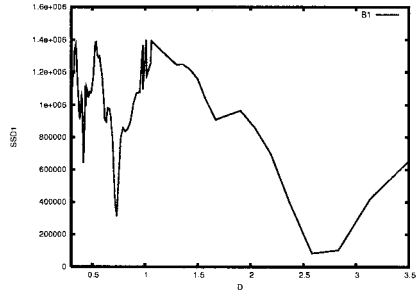


図7 基線長  $B_1=0.04$  m の  $D$  と  $SSD$

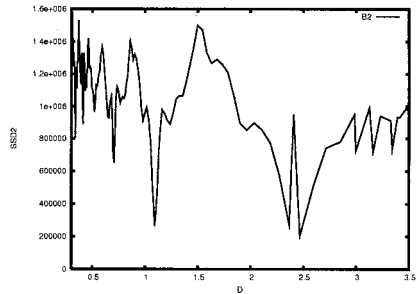


図8 基線長  $B_2=0.08$  m の  $D$  と  $SSD$

い  $B_1$  では、真の対応点に対する極小値が求まっているが、曲線が緩やかで  $D$  の分解能が粗い。それに対して基線長が長い  $B_2$  や  $B_5$  では、急峻な極小値があり  $D$  の精度が高くなっているが、偽対応の極小値が生じている。

図 10 は  $B_1, B_2, B_5$  を加算したマルチベースラインステレオ法の  $SSSD$  である。各  $SSD_i$  は  $D$  の分解能が違うため、 $D$  に対する分解能を 0.001 m とし、各  $SSD_i$  を線形補間して加算した。これによ

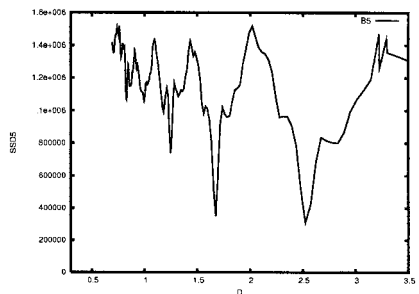


図9 基線長  $B_5=0.2$  m の  $D$  と  $SSD$

表 1 3次元座標値の結果

	$D$ [m]	$X$ [m]	$Y$ [m]	$Z$ [m]	$\theta(\Delta\theta)$ [度]	$\phi$ [度]
実測値	2.478	0.204	2.470	1.780	69.23	85.29
B1	2.583	0.199	2.575	1.698	71.62(0.79)	85.58
B2	2.467	0.189	2.460	1.659	71.64(1.66)	85.60
B5	2.524	0.192	2.517	1.678	71.64(3.99)	85.64
SSSD	2.524	0.192	2.517	1.678	71.64	85.64
	+0.046	-0.012	+0.047	-0.102	+2.41	+0.35

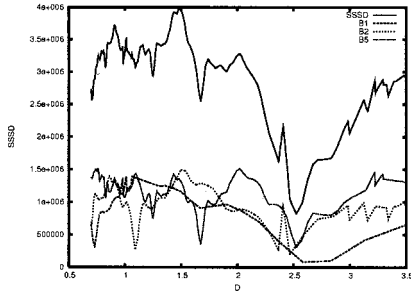


図 10 複数基線長による  $D$  と  $SSSD$

り偽対応点を除き高精度な3次元座標が求まった。

各最小値から算出した3次元座標を表1に示す。最下行はSSSDから求めた3次元座標値と実測値の差である。 $\Delta\theta$ は、各ステレオ対での天頂角の差である。テンプレートに使用した位置が実測値に比べ、水平距離では+0.046 mの誤差であった。高さ $Z$ の誤差が $X, Y$ に比べて大きく、内部パラメータおよび外部パラメータの誤差が考えられ、 $B2$ の誤差が特に大きいのは外部パラメータの誤差が他より大きかったことが考えられる。

#### 4 考察

基線長を光軸方向にとった魚眼カメラのステレオ視での計測精度を調べるために、図11に示す3次元空間の5つの対象点に対して考察する。各対象点は $x=0$  mの $YZ$ 平面上にあり、基線長 $B1, B5$ のステレオ対の上方のカメラ座標系において $(y, z)$ [m]が $a(2, 0), b(2, 1), c(2, 2), d(1, 2), e(0, 2)$ である。各対象点に対してカメラ原点からの距離を延ばした $a', b', c', d', e'$ を考える。上方のカメラ座標系では同一の天頂角および像高であるが、下方のカメラ座標系では天頂角 $\theta$ および像高 $r$ に差が生じる。

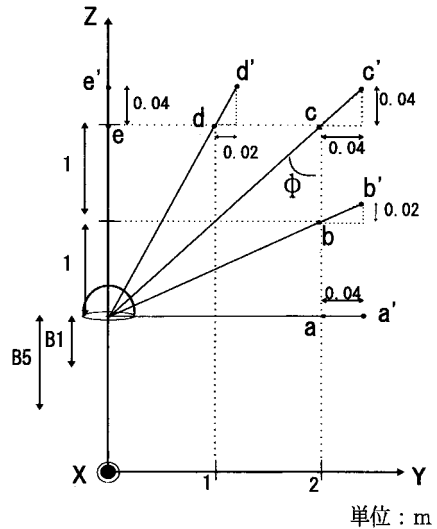


図 11 3次元計測精度

表 2 基線長  $B_1$  の計測精度

	$Y$ [m]	$\Delta Z$ [m]	$\theta$ [度]	$r$ [pixel]
a	2.00	0.04	88.854	1385.932
a'	+0.04	+0.00	+0.022	+0.277
b	2.00	1.04	62.526	1027.496
b'	+0.04	+0.02	+0.017	+0.261
c	2.00	2.04	44.433	748.610
c'	+0.04	+0.04	+0.011	+0.176
d	1.00	2.04	26.114	447.298
d'	+0.02	+0.04	+0.009	+0.147
e	0.00	2.04	0.000	0.000
e'	+0.00	+0.04	+0.000	+0.000

表3 基線長  $B_5$  の計測精度

	Y[m]	$\Delta Z$ [m]	$\theta$ [度]	r[pixel]
a	2.00	0.20	84.289	1328.523
a'	+0.04	+0.00	+0.011	+1.425
b	2.00	1.20	59.036	975.494
b'	+0.04	+0.02	+0.083	+1.243
c	2.00	2.20	42.274	713.945
c'	+0.04	+0.04	+0.051	+0.820
d	1.00	2.20	24.444	419.144
d'	+0.02	+0.04	+0.039	+0.651
e	0.00	2.20	0.000	0.000
e'	+0.0	+0.04	+0.000	+0.000

表2は基線長  $B_1$  (4 cm) の下方カメラ座標系での対象点の計測精度である。aとa'では光軸からの距離が0.04 m異なるが、4 cm 下方のカメラでは天頂角で+0.022度、像高で+0.277 pixelの差しかなく、異なる対象点として検出できない。天頂角が小さくなるとさらに像高差が小さくなる。表3は基線長  $B_5$  (20 cm) の下方カメラ座標系での対象点の計測精度である。基線長が長いと距離に対する分解能が高くなる。天頂角45度の対象点cとc'では、像高差が1画素未満なので検出できないが、bとb'は1画素以上なので異なる3次元座標として検出可能である。 $B_1, B_5$ を一つの基線長に置き換えて考えると、近くの対象点に対する分解能は高くても遠くの対象点に対する分解能は低い。また、基線長を光軸方向にとっているため、天頂角が小さいと検出精度が悪くなる。

実験結果では、天頂角約70度、光軸からの水平距離約2.5 mの対象点に対して最大基線長20 cmのマルチベースラインステレオ法によって算出した水平距離の誤差が0.046 mであったが、カメラの内部パラメータおよび外部パラメータの誤差が無いとしても、同程度の検出精度であると考えられる。

## 5 おわりに

本論文では、視野角180度の円周魚眼カメラを用いて、鉛直上向きの光軸方向にステレオ視の基線長をとり、マルチベースラインステレオ法によって全天を3次元計測する手法を提案した。

室内実験を行い、算出した3次元座標の誤差に

ついて考察した。基線長と検出可能な3次元座標精度との関係を把握して利用する必要がある。カメラの内部パラメータおよび外部パラメータの誤差が考えられ、その校正<sup>6, 7)</sup>が必要である。さらに、天頂角の小さな範囲を計測するために基線長を水平方向にとることも考える。

## 参考文献

- 1) 八木康史, 横矢直和: "全方位ビジョン: センサ開発と応用の最新動向" 情報処理学会論文誌 Vol.42 No.SIG 13(CVIM 3) pp.1-18 (2001)
- 2) 宮川勲, 若林佳織, 荒川賢一: "魚眼投影モデルに基づく画像系列からの平面運動と3次元形状の復元" 電子情報通信学会論文誌 Vol.J87-D-II, No.5, pp.1120-1132 (2004)
- 3) 茶園篤, 山澤一誠, 横矢直和, 竹村治雄: "全方位ステレオ視による3次元情報の獲得" 映像情報メディア学会誌 Vol.51, No.10, pp.1745-1753 (1997)
- 4) 奥富正敏, 金出武雄: "複数の基線長を利用したステレオマッチング" 電子情報通信学会論文誌 Vol.J75-D-II No.8 pp.1317-1327 (1992)
- 5) 大崎紘一, 神代充, 宗澤良臣, 梶原康博: "画像認識システム学" pp.103-125, 共立出版 (2005)
- 6) 中野誠士, 李仕剛, 千葉則茂: "球面モデルに基づくしま模様パターンを用いた魚眼カメラの校正" 電子情報通信学会論文誌 Vol.J90-D No.1 pp73-82 (2007)
- 7) 駒形英樹, 石井郁夫, 高橋章, 若月大輔, 今井博英: "魚眼カメラ内部パラメータの幾何学的キャリブレーション法" 電子情報通信学会論文誌 Vol.J89-D No.1 pp64-73 (2006)