

上向き魚眼カメラの水平回転移動によるステレオ視

吉 本 覚^{†1} 久保 守^{†1} 村本 健一郎^{†1}

本論文では、天頂角 90° かつ全周 360° を一度に撮影できる魚眼カメラを鉛直上向きに設置し、水平に回転移動させる複数の平行ステレオ視を提案する。この手法を用いて、全方位の 3 次元再構成を目指す。提案手法の有効性を示すために撮影装置による実験を行い、実測値と計算値の比較により、精度の検証を行った。

Stereo by the horizontal rotary movement of the upswing fisheye camera

SATORU YOSHIMOTO,^{†1} KUBO MAMORU^{†1}
and MURAMOTO KENICHIRO^{†1}

In this paper, the upswing fisheye camera that can shoot up once the zenith angle of 90 degrees and all around 360, stereo vision is proposed to move the horizontal rotation. Using this technique, aimed at all directions three-dimensional reconstruction. In this study, using multiple stereo pairs of images obtained by rotating the horizontal moving upswing fisheye camera, Calculate the coordinates of the three-dimensional objects, by comparison of calculated and measured values, for the verification of accuracy. In fact, experiments conducted by the shooting device to indicate the effectiveness of the proposed technique.

^{†1} 金沢大学大学院自然科学研究科電子情報工学専攻

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

1. はじめに

周囲の 3 次元環境を把握するために、これまで様々な全方位視覚システムが開発されている¹⁾。魚眼カメラは、移動ロボットの障害物回避や位置検出²⁾、監視カメラの人物追跡、車周囲のモニタリング³⁾ など様々な分野に応用されている。円周魚眼カメラは、視野角が 180° あり、天頂角 90° かつ全周 360° の光軸方向の半球を一度に撮影できるため、鉛直上向きに使用すれば、全方位に加えて上方空間を 3 次元計測することができる。

2 台のカメラの光軸を平行にした平行ステレオでは、基線比（カメラから対象までの距離に対する基線の長さ）が大きいほど 3 次元位置の推定精度が高くなるが、オクルージョンやステレオマッチングでの誤対応が生じやすい。基線比を小さくすれば、精度が悪くなる。そこで、基線比の異なる複数の平行ステレオを用いるマルチベースラインステレオ法⁴⁾ が提案されている。この手法は各ステレオ対から得られるマッチング情報を組み合わせて最も確からしい対応点を決定する方法であり、誤対応を減らし、推定精度を向上することができる。本研究では、上向き魚眼カメラを水平に回転移動させることで、基線比の異なる複数の平行ステレオを実現する。

計測対象に対してステレオ視の基線を垂直にとると、そうでない同じ基線長の場合に比べて、実質的に基線比が大きくなり計測精度がよい。水平回転移動によるステレオ視では、様々な方位の基線が考えられ、天頂角の小さい対象では大差ないが、天頂角の大きい対象ではその方位によって、それと垂直となる基線を選ぶことで、高い計測精度を実現する。

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魚眼カメラを用いる。以下に、魚眼投影モデル、魚眼カメラの水平回転移動、複数のステレオペア画像による 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 は世界座標系 ($X_W Y_W Z_W$) 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。世界座標系での対象点を $P(X_p, Y_p, Z_p)$ 、カメラ視点を $\mathbf{T}(T_x, T_y, T_z)$ 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。

なお、視線ベクトル TP がカメラ座標系の Z_C 軸となす角を天頂角 $\theta (0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ と

し、視線ベクトル TP が $X_C Y_C$ 平面上で X_C 軸となす角を方位角 $\phi (0^\circ \leq \phi < 360^\circ)$ とすると、単位ベクトルは、

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

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 $\mathbf{C}(C_x, C_y)$ から投影点 P_i までの像高 $r[\text{pixel}]$ と天頂角 θ の関係は、

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

である。ここで、定数 $R[\text{pixel}]$ は天頂角 θ が 90° のときの像高 (画像半径) である。式 (2) より、天頂角 θ は、

$$\theta = 2 \sin^{-1}\left(\frac{r}{\sqrt{2}R}\right), \quad 0^\circ \leq \phi < 90^\circ \quad (3)$$

となる。方位角 ϕ は、

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), \quad 0^\circ \leq \phi < 360^\circ \quad (4)$$

となる。図 2 に画像座標系 $(X_i Y_i)$ を示す。

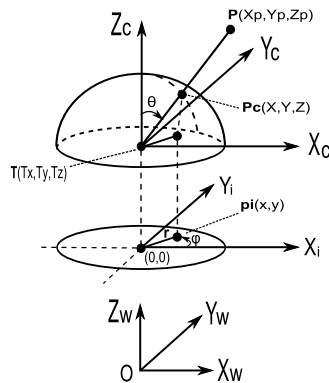


図 1 魚眼投影モデル:世界座標系とカメラ座標系
Fig. 1 Fisheye projection model: World coordinate system and a camera coordinate system

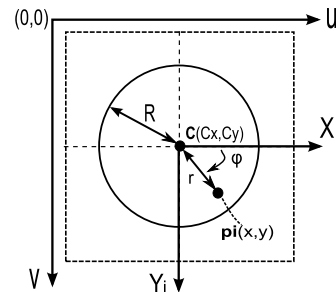


図 2 画像座標系
Fig. 2 Image coordinate system

2.2 魚眼カメラの水平回転移動

魚眼カメラの水平回転移動を図 3 に示す。世界座標系 $(X_W Y_W Z_W)$ の原点から垂直方向に $C_0 z[\text{m}]$ 離れた点を、回転中心 $\mathbf{C}_0(0, 0, C_0 z)$ とする。回転中心 $\mathbf{C}_0$ から半径 $b[\text{m}]$ 離れた円周上で、魚眼カメラを水平に回転移動させる。回転角度 α ずつ魚眼カメラを移動させると、 $\mathbf{C}_i (i = 1, 2, \dots, N, N = 360/\alpha)$ 地点で合計 N 枚の画像を取得できる。ここで、各カメラ座標系の Z_C 軸は鉛直上向き、 Y_C 軸は回転中心 $\mathbf{C}_0$ 方向となるよう、 Z_W 軸周りに回転させる。なお、図 3 は $\alpha = 30^\circ$ 、 $N = 12$ の場合である。

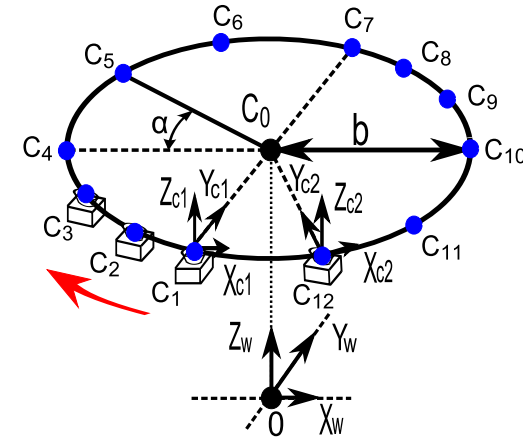


図 3 魚眼カメラの水平回転移動モデル ($\alpha = 30^\circ$, $N = 12$ の場合)
Fig. 3 The horizontal rotary movement model of the fisheye camera (case : $\alpha = 30^\circ$, $N = 12$)

2.3 複数のステレオペア画像による 3 次元座標の算出

撮影した N 枚の画像から、ステレオ視に用いる 2 枚の画像の組み合わせについて考える。 $N = 12$ の場合、ステレオペア画像の組み合わせは、全部で 66 通りとなる。ここでは、図 4 の 10 通りを取り上げる。(a)~(f) は回転直径を基線とするステレオペアで、66 通りの内で基線長が最大である。(a) と (g)~(j) は Y_W 軸に対して垂直な基線をもつステレオペアであり、基線長が異なる。

ステレオペア画像から対象点を手動で探索し、カメラ視点と対象点までの単位ベクトルを用いて、3 次元座標を算出する。さらに、図 4(a) と (g)~(j) のステレオ視を重ね合わせることで、高精度な 3 次元座標の算出が可能である。

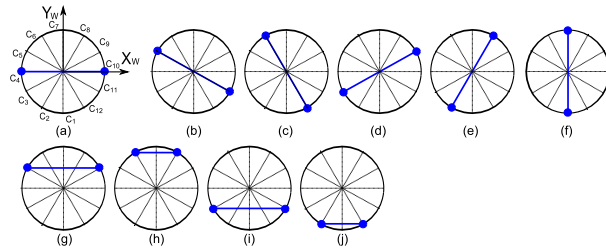


図 4 ステレオペア画像の組み合わせ
Fig. 4 stereo pair pattern

表 1 基線パターンと画像撮影点

Table 1 Baseline patterns and images taken point

パターン	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
撮影点	$C_{10,4}$	$C_{11,5}$	$C_{12,6}$	$C_{9,3}$	$C_{8,2}$	$C_{7,1}$	$C_{9,5}$	$C_{8,6}$	$C_{11,3}$	$C_{12,2}$

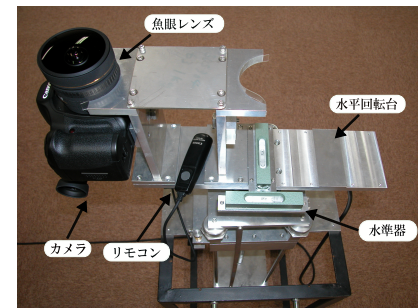
3. 実 験

図 5(a) に魚眼カメラの外観を示す。本研究で使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。魚眼カメラの整準は, 水準器を見ながら光軸 (Z_C 軸) が鉛直上向きになるように手動で行った。カメラの水平回転角度の調整は図 5(b) の自動回転ステージを用いた。

実験用の撮影ターゲットとして図 6 に示す模型を作成した。3 つの青い点を 3 次元座標計測の対象点とした。対象点の間隔は $1.00[m]$ である。図 6 の撮影ターゲットを天井に 1 つ, 壁に 2 つ設置し, 対象点は全部で 9 点とした。

世界座標系 ($X_W Y_W Z_W$) の原点から高さ $Z_W = 1.270[m]$ の点を, 回転中心 $C_0(0, 0, 1.270)$ とした。回転中心 C_0 から半径 $b = 0.200[m]$ 離れた円周上で, 魚眼カメラを水平に回転移動させた。回転角度 $\alpha = 30^\circ$ ずつ魚眼カメラを移動させ, $C_i (i = 1, 2, \dots, 12)$ 地点で合計 12 枚の画像を取得した。点 $P_i (i = 1, 2, \dots, 9)$ に対して, 図 4 の 10 パターンのステレオペア画像を用いて 3 次元座標計測を行った。

図 7 に, 対象点 $P_i (i = 1, 2, \dots, 9)$ と図 4(a) の場合の画像撮影点 $C_{10,4}$ の位置関係を示す。点 P_1, P_2, P_3 は Z_W 方向, 点 P_4, P_5, P_6 は X_W 方向, 点 P_7, P_8, P_9 は Y_W 方向の対象点である。図 4(a) の $C_{10,4}$ の基線, 点 P_4, P_5, P_6 とほぼ同じ方向で, 点 P_7, P_8, P_9 とほぼ垂直である。表 1 にステレオペアのパターンと画像の組み合わせを示す。



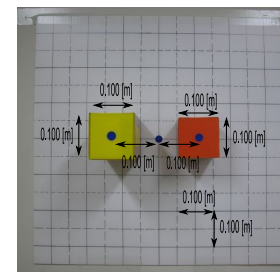
(a)



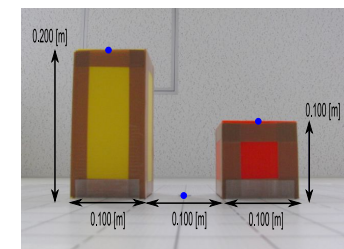
(b)

図 5 実験装置: (a) 魚眼カメラ (b) 自動回転ステージコントローラ

Fig. 5 Apparatus: (a) Fish-eye camera (b) Automatic rotary stage controller



(a)



(b)

図 6 撮影ターゲット: (a) 上から (b) 横から

Fig. 6 Taken target point model: (a) Top view (b) Side view

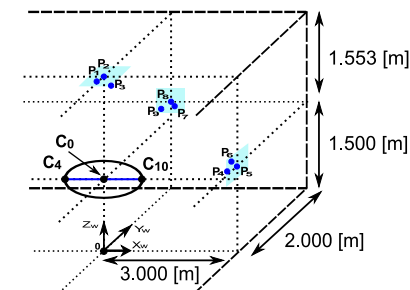


図 7 対象点 $P_i (i = 1, 2, \dots, 9)$ と画像撮影点 $C_{10,4}$ の位置

Fig. 7 Target point and images taken point

表 2 3次元座標値の結果： P_1 , P_2 , P_3
Table 2 Results of three-dimensional coordinate : P_1 , P_2 , P_3

	P_1			P_2			P_3		
	X[m]	Y[m]	Z[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]
実測値	-0.100	0.000	2.453	0.000	0.000	2.553	0.100	0.000	2.353
(a)	-0.083	-0.030	2.399	0.006	-0.030	2.485	0.101	-0.024	2.318
	0.017	-0.030	-0.054	0.006	-0.030	-0.068	0.001	-0.024	-0.035
(b)	-0.084	-0.028	2.397	0.006	-0.029	2.481	0.101	-0.023	2.316
	0.016	-0.028	-0.056	0.006	-0.029	-0.072	0.001	-0.023	-0.037
(c)	-0.083	-0.024	2.387	0.006	-0.026	2.466	0.100	-0.020	2.305
	0.017	-0.024	-0.067	0.006	-0.026	-0.087	-0.001	-0.020	-0.048
(d)	-0.083	-0.026	2.394	0.006	-0.026	2.473	0.100	-0.021	2.315
	0.017	-0.026	-0.059	0.006	-0.026	-0.080	0.000	-0.021	-0.038
(e)	-0.083	-0.024	2.386	0.006	-0.025	2.464	0.100	-0.019	2.307
	0.017	-0.024	-0.067	0.006	-0.025	-0.089	0.000	-0.019	-0.046
(f)	-0.082	-0.024	2.386	0.006	-0.024	2.458	0.099	-0.020	2.305
	0.018	-0.024	-0.067	0.006	-0.024	-0.095	-0.001	-0.020	-0.048
(g)	-0.081	-0.028	2.401	0.009	-0.029	2.480	0.104	-0.023	2.316
	0.019	-0.028	-0.052	0.009	-0.029	-0.073	0.004	-0.023	-0.037
(h)	-0.079	-0.027	2.401	0.012	-0.031	2.495	0.107	-0.024	2.323
	0.021	-0.027	-0.052	0.012	-0.031	-0.058	0.007	-0.024	-0.030
(i)	-0.087	-0.026	2.396	0.003	-0.026	2.482	0.098	-0.021	2.322
	0.013	-0.026	-0.057	0.003	-0.026	-0.071	-0.002	-0.021	-0.032
(j)	-0.090	-0.021	2.405	0.000	-0.022	2.489	0.096	-0.016	2.324
	0.010	-0.021	-0.048	0.000	-0.022	-0.065	-0.004	-0.016	-0.029

4. 結果と考察

表 2 に、天井 (Z_W 軸方向) に設置した対象点 P_1 , P_2 , P_3 の 3次元座標値 (X, Y, Z) の結果を示す。計算値と実測値に対する誤差 (計算値 - 実測値) を記す。

表 2 から、対象点 P_1 , P_2 , P_3 の X 座標の誤差 dx を図 8 に、 Y 座標の誤差 dy を図 9, Z 座標の誤差 dz を図 10 に示す。

表 2 から、どのステレオペアにおいても、 dz は dx , dy より大きくなった。ステレオペアの差は、点 P_2 の (f) と (h) の dz で最大 $0.037[m]$ であった。これは、後述する点 P_4 , P_5 , P_6 , P_7 , P_8 , P_9 におけるステレオペアの差に比べて小さい。

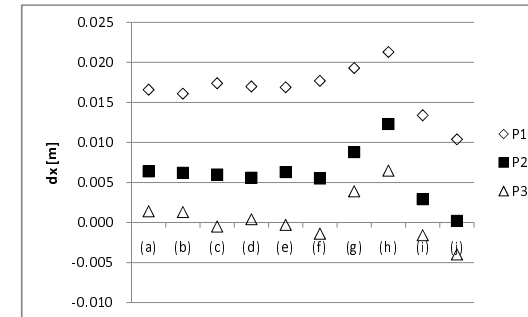


図 8 X 座標の誤差： P_1 , P_2 , P_3

Fig. 8 X coordinate error margin : P_1 , P_2 , P_3

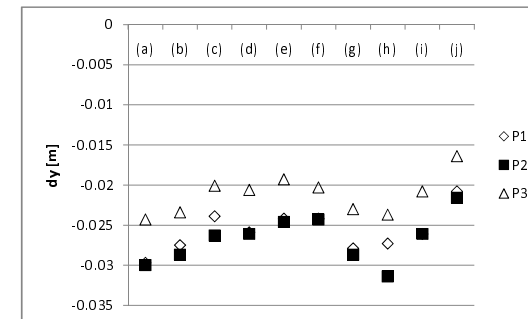


図 9 Y 座標の誤差： P_1 , P_2 , P_3

Fig. 9 Y coordinate error margin : P_1 , P_2 , P_3

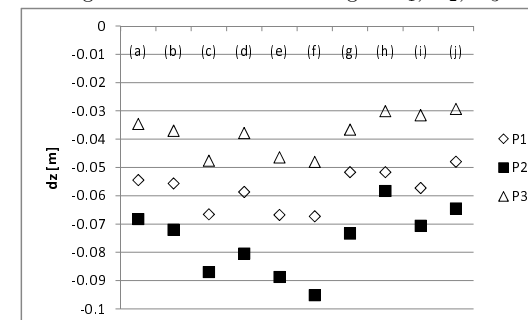


図 10 Z 座標の誤差： P_1 , P_2 , P_3

Fig. 10 Z coordinate error margin : P_1 , P_2 , P_3

表 3 3次元座標値の結果： P_4 , P_5 , P_6
Table 3 Results of three-dimensional coordinate : P_4 , P_5 , P_6

	P_4			P_5			P_6		
	X[m]	Y[m]	Z[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]
実測値	2.900	-0.100	1.500	3.000	0.000	1.500	2.800	0.100	1.500
(a)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(b)	2.066	-0.092	1.456	2.207	-0.023	1.464	2.180	0.056	1.478
	-0.834	0.008	-0.044	-0.793	-0.023	-0.036	-0.620	-0.044	-0.022
(c)	2.527	-0.112	1.500	2.645	-0.024	1.505	2.506	0.067	1.510
	-0.373	-0.012	0.000	-0.355	-0.024	0.005	-0.294	-0.033	0.010
(d)	2.205	-0.091	1.468	2.259	-0.014	1.469	2.068	0.061	1.465
	-0.695	0.009	-0.032	-0.741	-0.014	-0.031	-0.732	-0.039	-0.035
(e)	2.545	-0.106	1.500	2.647	-0.018	1.506	2.472	0.071	1.507
	-0.356	-0.006	0.000	-0.354	-0.018	0.006	-0.328	-0.029	0.007
(f)	2.584	-0.109	1.506	2.658	-0.020	1.506	2.499	0.071	1.508
	-0.316	-0.009	0.006	-0.342	-0.020	0.006	-0.301	-0.029	0.008

表 3 に, X_W 軸方向の壁に設置した対象点 P_4 , P_5 , P_6 の 3 次元座標値の結果を示す. 表 3 から, 対象点 P_4 , P_5 , P_6 の X 座標の誤差を図 11 に, Y 座標の誤差を図 12, Z 座標の誤差を図 13 に示す.

点 P_4 , P_5 , P_6 の方向は, 基線 (a) とほぼ同じであるため計算から除外した. 基線 (g)~(j) も同様.

同じ基線である (b)~(f) を比較すると, P_4 , P_5 , P_6 の方向と垂直基線の (f) の誤差が最も小さく, (c) と (e), (b) と (d) の順に基線が平行に近づくにしたがって誤差が大きくなっている.

表 4 に Y_W 軸方向の壁に設置した対象点 P_7 , P_8 , P_9 の 3 次元座標値の結果を示す. 表 4 から, 対象点 P_7 , P_8 , P_9 の算出値と実測値の誤差を, それぞれ図 14, 図 15, 図 16 に示す.

点 P_7 , P_8 , P_9 の方向は, 基線 (f) とほぼ同じであるため計算から除外した. 図 15 の dy において, 同じ基線である (b)~(e) を比較すると, 点 P_7 , P_8 , P_9 の方向と垂直な基線の (a) の誤差が最も小さく, (b) と (d), (c) と (e) の順に基線が平行に近づくにしたがって誤差が大きくなっている.

基線長の異なる (a), (g)~(j) を比較すると, 基線長の長い (a) の誤差が小さく, 短いほど誤差が大きくなる傾向がみられる.

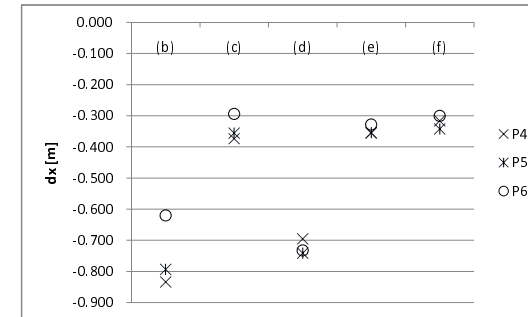


図 11 X 座標の誤差： P_4 , P_5 , P_6

Fig. 11 X coordinate error margin : P_4 , P_5 , P_6

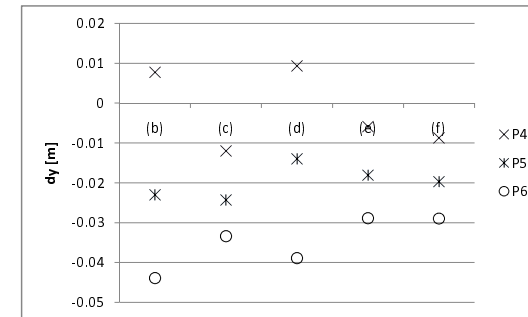


図 12 Y 座標の誤差： P_4 , P_5 , P_6

Fig. 12 Y coordinate error margin : P_4 , P_5 , P_6

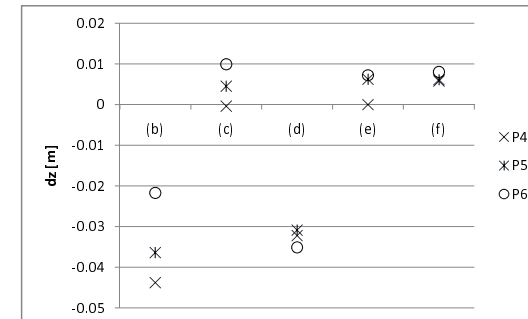


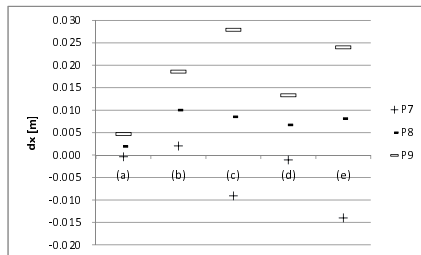
図 13 Z 座標の誤差： P_4 , P_5 , P_6

Fig. 13 Z coordinate error margin : P_4 , P_5 , P_6

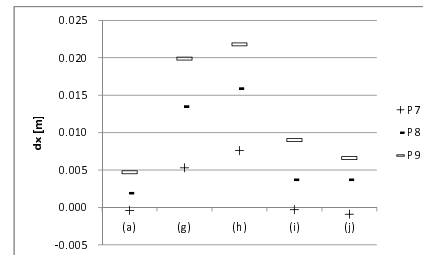
表 4 3次元座標値の結果： P_7 , P_8 , P_9

Table 4 Results of three-dimensional coordinate : P_7 , P_8 , P_9

	P_7			P_8			P_9		
	X[m]	Y[m]	Z[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]
実測値	0.100	1.900	1.500	0.000	2.000	1.500	-0.100	1.800	1.500
(a)	0.100	1.860	1.570	0.002	1.977	1.574	-0.095	1.764	1.570
	0.000	-0.040	0.070	0.002	-0.023	0.074	0.005	-0.036	0.070
(b)	0.102	1.750	1.550	0.010	1.831	1.550	-0.081	1.647	1.547
	0.002	-0.150	0.050	0.010	-0.169	0.050	0.019	-0.153	0.047
(c)	0.091	1.575	1.518	0.009	1.620	1.514	-0.072	1.438	1.510
	-0.009	-0.325	0.018	0.009	-0.380	0.014	0.028	-0.362	0.010
(d)	0.099	1.752	1.548	0.007	1.862	1.551	-0.087	1.690	1.553
	-0.001	-0.148	0.048	0.007	-0.138	0.051	0.013	-0.110	0.053
(e)	0.086	1.484	1.504	0.008	1.611	1.512	-0.076	1.518	1.523
	-0.014	-0.416	0.004	0.008	-0.389	0.012	0.024	-0.282	0.023
(f)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(g)	0.105	1.768	1.569	0.014	1.866	1.572	-0.080	1.683	1.570
	0.005	-0.132	0.069	0.014	-0.135	0.072	0.020	-0.117	0.070
(h)	0.108	1.763	1.580	0.016	1.872	1.586	-0.078	1.689	1.584
	0.008	-0.137	0.080	0.016	-0.128	0.086	0.022	-0.111	0.084
(i)	0.100	1.809	1.540	0.004	1.910	1.541	-0.091	1.721	1.541
	0.000	-0.091	0.040	0.004	-0.090	0.041	0.009	-0.079	0.041
(j)	0.099	1.824	1.526	0.004	1.948	1.529	-0.093	1.750	1.530
	-0.001	-0.076	0.026	0.004	-0.052	0.029	0.007	-0.050	0.030

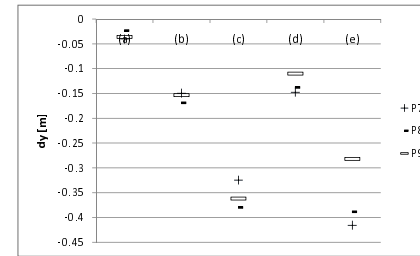


(a)

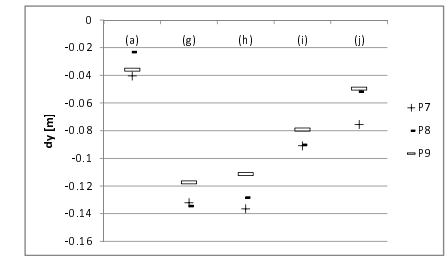


(b)

図 14 X座標の誤差： P_7 , P_8 , P_9 (a) パターン (a)～(e) (b) パターン (a), (g)～(j)
Fig. 14 X coordinate error margin : P_7 , P_8 , P_9 (a) Patterns(a)～(e) (b) Patterns(a), (g)～(j)

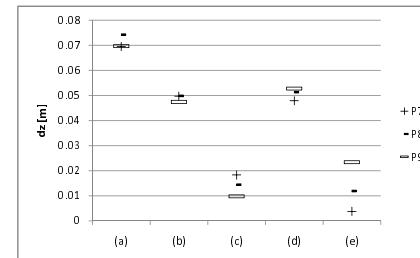


(a)

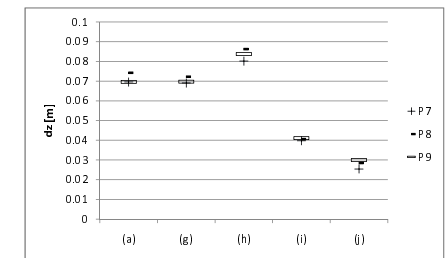


(b)

図 15 Y座標の誤差： P_7 , P_8 , P_9 (a) パターン (a)～(e) (b) パターン (a), (g)～(j)
Fig. 15 Y coordinate error margin : P_7 , P_8 , P_9 (a) Patterns(a)～(e) (b) Patterns(a), (g)～(j)



(a)



(b)

図 16 Z座標の誤差： P_7 , P_8 , P_9 (a) パターン (a)～(e) (b) パターン (a), (g)～(j)
Fig. 16 Z coordinate error margin : P_7 , P_8 , P_9 (a) Patterns(a)～(e) (b) Patterns(a), (g)～(j)

5. おわりに

本論文では、視野角 180° の鉛直上向き魚眼カメラを水平に回転移動させて得られた画像を用いて平行ステレオ視を行い、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。計測対象に対してステレオ視の基線を垂直にとると、そうでない場合に比べて、実質的に基線比が大きく計測精度が良くなることを確認した。水平回転移動によるステレオ視では、様々な方位の基線が考えられ、天頂角の小さい対象では大差ないが、天頂角の大きい対象ではその方位によって、それと垂直となる基線を選ぶことで、計測精度が良くなることを確認した。今後はマルチベースライン手法を用いて、さらに精度の高い 3 次元座標計測を行う。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^{5),6)}が必要である。

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) 外村元伸: "クルマに搭載され始めた魚眼レンズの研究" デザインウェーブマガジン pp.111-125 (2008)
- 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) 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)
- 6) 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)