

## ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーション

呉 海元<sup>†</sup> 和田 俊和<sup>†</sup> 萩原 庸二<sup>†</sup>

本稿では、外部カメラで自己位置同定をしながら床面を移動する車両型センサレスロボットシステムのためのカメラキャリブレーション法を提案する。センサレスロボットは、単純な処理で正確な自己位置同定が行え、ロボット本体も安価であるという利点がある。しかし、ロボットを正確に動作させるためには、床面とカメラの位置関係などをあらかじめ求めておかなければならず、カメラの位置や方向を変えるたびにキャリブレーションをやりなおさなければならない。この煩雑さを解消するため、システムの初期化動作として、ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーションを行う方式を採用する。これによって求められるパラメータは、床面を基準としたカメラの視線方向および、カメラの焦点距離であり、これらのパラメータによって床面を真上から見たときのロボットの軌跡が計算できる。ここで用いる車両型ロボットはキャリブレーション前には正確な直進動作は行えないが、ステアリング角を一定に保ち、低速で動作すれば平面上で真円を描くことができる。この軌跡は画像平面上では楕円として観測され、これを手がかりとして上述のキャリブレーションが行える。シミュレーションによる誤差評価、4 点対応から求めた Homography との比較実験、さらに実機を用いた実験により提案手法の有効性を確認した。

### Robot Body Guided Camera Calibration

HAIYUAN WU,<sup>†</sup> TOSHIKAZU WADA<sup>†</sup> and YOUJI HAGIWARA<sup>†</sup>

This paper presents a novel camera calibration method for RC car robot control system with external cameras. This system can be regarded as a sensorless robot system, which has advantages of low-cost body and precise localization by external camera. The only drawback is that it requires a priory camera calibration. For this calibration, we don't use any specially designed object, but the robot is employed as a calibration object. Before the calibration, the robot cannot move along a straight line, however, it can move along a circle by keeping constant steering angle and slow speed. The circular locus of the robot is projected as an ellipse on the image plane by the perspective projection. Based on this geometric relationship, we propose a calibration method of the focal length and the view direction of the camera relative to the working plane of the robot. Through computer simulations and experiments with a real camera and a robot, we have confirmed that our method is more robust than the Homography based calibration using four point correspondences.

#### 1. はじめに

我々は、移動ロボットに対して送ったアクションコマンドから予測されるロボットの行動と、外部カメラを通じて観測したロボットの実際の行動の食い違いから、衝突やすべり、ボディの遮蔽など、ロボットのボディと環境の相互作用を検出することによって、視覚だけでは得られない実環境の情報を獲得するための環境認識方式に関する研究を行っている。この研究では、外部カメラを使用するため、カメラの焦点距離やロボットの移動する平面とカメラの視線方向がなす角、などのパラメータをあらかじめ求めておかなければならない。

通常はカメラの取り付け位置や向きが変化するため、カメラキャリブレーションをやり直すことになる。新しい設定でロボットが制御できるようになるまでに多くの手間を要する。この煩雑さを解消するため、本システムでは初期化動作として、ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーションを行う方式を採用する。これによって求められるパラメータは、床面を基準としたカメラの視線方向とカメラの焦点距離であり、これらのパラメータによって、平行移動やスケールを決定することはできないが、床面を真上から観測したときのロボットの軌跡を計算することはできる。

このシステムでは、環境との相互作用が起こりやすいようにするため軽量の四輪駆動ラジコン車両をロボットとして用いている。この車両型ロボットは、カメラキャリブレーションを行う前には正確な直進動作

<sup>†</sup> 和歌山大学  
Wakayama University

は行えないため、ロボットを直進させてキャリブレーションを行うことはできない。しかし、ステアリング角を一定に保ち、低速で移動すれば平面上で真円を描くことができる。この軌跡は透視投影により画像平面上では楕円として観測される（図1参照）。本稿では、この楕円の形状を手がかりとして上述のキャリブレーションを行う方法について述べる。

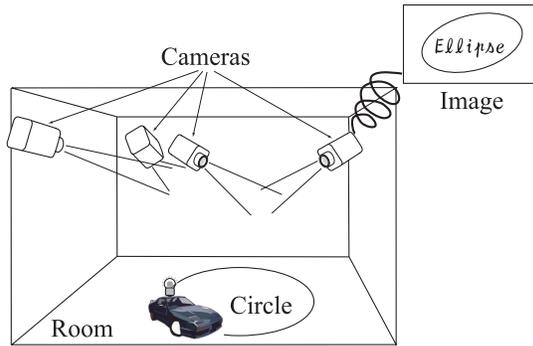


図1 システム構成図  
Fig. 1 The system construction

円パターンを利用したカメラキャリブレーション方法はこれまでも幾つか提案されている<sup>1)2)3)4)5)</sup>。Mengら<sup>1)</sup>は、円周とその円心を通る直線パターンに対して、3枚以上の異なる視点から得られた画像を用いた方法を提案した。Wangら<sup>2)</sup>は、直線パターンとそれらの交点の3枚以上の異なる視点からの画像を用いて、同一円周上にある円心を通る点のペアを発見することにより、画像間の点対応なしでカメラキャリブレーション法を提案した。Kimら<sup>3)4)</sup>、Yangら<sup>5)</sup>は同心円パターンを利用して、複数枚の異なる視点の透視投影画像を用いたキャリブレーション法をそれぞれ提案している。

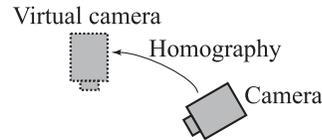
これに対して、本稿で提案する手法は単一の平面上の一つの円パターン（床面上で真円を描いて移動するロボットの軌跡）だけから、カメラの仰角とカメラの焦点距離を求めることができる。

これとほぼ同等のキャリブレーションは、Homographyによって計算することができる。この場合、床面に対して垂直方向から観測している仮想カメラを想定し、斜めから観測しているカメラとの間で Homography 行列を計算することになる。Homography 行列を計算するには、カメラの焦点距離と、カメラ間での4点対応が必要になる。そして、この行列を分解して実カメラと仮想カメラ間の平行移動と回転も求めることができるが、Homography 行列は2通りの分解<sup>8)10)</sup>が得られ、それらのうちのどちらが正しいかを決定す

ることはできないという問題点がある。

これに対して、本稿で述べる手法では、カメラの撮像面とロボットが移動する平面との間の回転角を、唯一に決定することができるという利点がある。すなわち、単に異なるカメラ間で画像の変換が行えるだけでなく、スケールと平行移動の不定性は残るものの、実空間におけるカメラの相対的位置関係をユニークに決定できるという特徴がある。

さらに、本手法では画像と床の間の点の対応付けを逐一行う必要はなく、軌跡の形状のみから、真上にある仮想カメラへの Homography 変換行列を求めることができる（図2に参照）。シミュレーションによる誤差評価、4点対応から求めた Homography との比較実験、さらに実機を用いた実験により提案手法の有効性を確認した。



Ground  
図2 平面を観測している2台のカメラ間の変換  
Fig. 2 Conversion between two cameras which are observing a same plane

## 2. 半径と中心が未知である真円を用いたカメラキャリブレーション

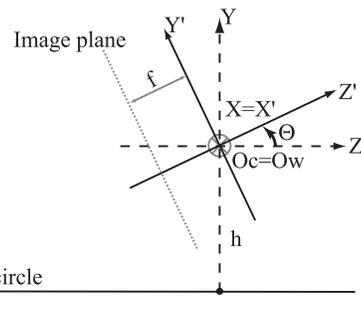


図3 世界座標系とカメラ座標系  
Fig. 3 The world coordinates and camera coordinates

本稿では、世界座標系 ( $O_w$ - $XYZ$ ) とカメラ座標系 ( $O_c$ - $X'Y'Z'$ ) の原点位置  $O_w, O_c$  および、 $X, X'$  軸が

一致しており、カメラの光軸が  $Z'$  軸、世界座標系の  $Z$  軸とのなす角度を  $\theta$  度であると仮定する（図 3 参照）。また、カメラの焦点距離を  $f$ 、座標原点から床までの距離を  $h$ 、円の半径を  $r$ 、中心を  $(x_c, y_c, z_c)$  とする。

## 2.1 半径と中心が未知である真円と透視投影像の楕円との関係

本稿では、カメラが  $X$  軸回りに回転することを仮定しているので、

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y \cos \theta - z \sin \theta \\ z' = y \sin \theta + z \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

という関係が成り立つ。平面上の円の方程式は次式で表される。

$$\begin{cases} x = x_c + r \cos t \\ y = -h \\ z = z_c + r \sin t \end{cases} \quad (2)$$

但し、 $t$  は角度パラメータである。3次元空間中の点  $(x, y, z)$  を画像平面上に透視投影した座標を  $(I_x, I_y)$  とすると、次式が成り立つ。

$$\begin{cases} I_x = f \cdot \frac{x}{-y \sin \theta - z \cos \theta} \\ I_y = f \cdot \frac{y \cos \theta - z \sin \theta}{-y \sin \theta - z \cos \theta} \end{cases}$$

さらに、式 (2) を代入して

$$I_x = f \cdot \frac{x_c + r \cos t}{h \sin \theta - z_c \cos \theta - r \cos \theta \sin t} \quad (3)$$

$$I_y = f \cdot \frac{-h \cos \theta - z_c \sin \theta - r \sin \theta \sin t}{h \sin \theta - z_c \cos \theta - r \cos \theta \sin t} \quad (4)$$

が得られる。式 (3) と (4) を整理すると

$$\sin t = \frac{(I_y h + f z_c) \sin \theta + (f h - I_y z_c) \cos \theta}{I_y r \cos \theta - f r \sin \theta} \quad (5)$$

と

$$\cos t = \frac{-I_x h + f x_c \sin \theta - I_y x_c \cos \theta}{I_y r \cos \theta - f r \sin \theta} \quad (6)$$

が得られる。 $\sin^2 t + \cos^2 t = 1$  なので

$$\begin{aligned} & [(I_y h + f z_c) \sin \theta + (f h - I_y z_c) \cos \theta]^2 \\ & + [-I_x h + f x_c \sin \theta - I_y x_c \cos \theta]^2 \\ & = [I_y r \cos \theta - f r \sin \theta]^2 \end{aligned}$$

の関係が成り立つ。これを楕円の一般方程式

$$A'I_x^2 + B'I_x I_y + C'I_y^2 + D'I_x + E'I_y + F' = 0 \quad (7)$$

の形で整理すると、

$$\begin{cases} A' = h^2 \\ B' = 2hx_c \cos \theta \\ C' = (h \sin \theta - z_c \cos \theta)^2 + (x_c^2 - r^2) \cos^2 \theta \\ D' = -2fhx_c \sin \theta \\ E' = 2f[hz_c(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \\ \quad + (h^2 - z_c^2 - x_c^2 + r^2) \sin \theta \cos \theta] \\ F' = f^2[(z_c \sin \theta + h \cos \theta)^2 + (x_c^2 - r^2) \sin^2 \theta] \end{cases}$$

となる。しかし、式 (7) を定数倍しても同じ楕円を表しているので、

$$I_x^2 + BI_x I_y + CI_y^2 + DI_x + EI_y + F = 0$$

という形式に正規化すると、各係数は下記のようになる。

$$\begin{cases} B = 2x'_c \cos \theta \\ C = (\sin \theta - z'_c \cos \theta)^2 + (x'_c{}^2 - r'^2) \cos^2 \theta \\ D = -2fx'_c \sin \theta \\ E = 2f[z'_c(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \\ \quad + (1 - z'_c{}^2 - x'_c{}^2 + r'^2) \sin \theta \cos \theta] \\ F = f^2[(z'_c \sin \theta + \cos \theta)^2 + (x'_c{}^2 - r'^2) \sin^2 \theta] \end{cases}$$

ここで、 $x'_c = x_c/h$ 、 $z'_c = z_c/h$ 、 $r' = r/h$  である。

## 2.2 楕円方程式の係数とカメラパラメータの関係

上記の係数の比  $D/B$  より、次のようなカメラの焦点距離  $f$  とチルトの角度  $\theta$  の関係式を得ることができる。

$$f \cdot \tan \theta = -\frac{D}{B} \quad (8)$$

床上の中心位置  $(x_c, z_c)$  と半径  $r$  が未知パラメータであるが、一つの円に対して、 $x_c^2 + z_c^2 - r^2$  の値は一定である。以下では、 $x_c^2 + z_c^2 - r^2$  を一つの未知パラメータとし、それを消すことにより、 $f$  を楕円方程式の係数から求める。

$C \times f^2 + F$  より、

$$x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2 = \frac{f^2(C - 1) + F}{f^2} \quad (9)$$

$\frac{E}{f}$  より、

$$\frac{E}{f} = -(x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) \sin 2\theta + \sin 2\theta - 2z'_c \cos 2\theta \quad (10)$$

$C$  より、

$$C = (x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) \frac{1 + \cos 2\theta}{2} + \frac{1 - \cos 2\theta}{2} - z'_c \sin 2\theta \quad (11)$$

という関係式が導出できる。式 (10) と (11) より、次の連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} -\sin 2\theta \cdot (x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) - 2 \cos 2\theta \cdot z_c' \\ \quad = \frac{E}{f} - \sin 2\theta \\ \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \cdot (x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) - \sin 2\theta \cdot z_c' \\ \quad = C - \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \end{cases} \quad (12)$$

これを解くと

$$x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2 = (1-C) \tan^2 \theta - \frac{E}{f} \tan \theta + C \quad (13)$$

となり、式 (9) から式 (13) を引くことにより

$$\frac{f^2(C-1) + F}{f^2} = (1-C) \tan^2 \theta - \frac{E}{f} \tan \theta + C$$

が得られる。この式を整理し、

$$(1-C)(f \cdot \tan \theta)^2 - E(f \cdot \tan \theta) = F - f^2 \quad (14)$$

となり、式 (8) を式 (14) に代入すれば、

$$f^2 = F - E \cdot \frac{D}{B} + (C-1) \frac{D^2}{B^2}$$

$f$  はカメラの焦点距離なので、正の解しか物理的な意味を持たない。従って、次の解を採用する。

$$f = \frac{1}{|B|} \sqrt{B^2 F - BDE + (C-1)D^2} \quad (15)$$

以上により、楕円方程式の係数とカメラパラメータの関係は次式で表せることが分かる。

$$\begin{cases} f = \frac{1}{|B|} \sqrt{B^2 F - BDE + (C-1)D^2} \\ \tan \theta = -\frac{1}{f} \cdot \frac{D}{B} \end{cases} \quad (16)$$

### 3. 画像から楕円方程式の獲得

提案手法の精度を保証するために、画像から楕円の方程式の係数を正確に求めることが必要である。本稿では、楕円上の点における画像座標を  $(x_i, y_i); i = 1, \dots, n$  とし、楕円の一般方程式を

$$Q(x, y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$$

とする。定数倍しても同じ楕円を表しているので、 $A, B, C, D, E, F$  の 6 つの変数の中、5 つの独立な変数しかない。従って、画像から 5 点が得られれば、楕円の方程式を確定できる。点の数が 5 以上 ( $n \geq 5$ ) の場合、最小二乗法を用いて楕円の方程式を求めるために、

$$G = \sum_{i=1}^n Q^2(x_i, y_i)$$

の値を最小にする  $A, B, C, D, E, F$  を求めれば良い。ただし、有意義な解 ( $A, B, C, D, E, F$  が全て 0 以外の解) を得るために、 $A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2 + F^2 = 1$  の条件で  $G$  の最小二乗解を求める。 $G$  の計算式を下

記に書きなおすことができる。

$$G = V^T S V + \lambda V^T V - \lambda \quad (17)$$

ここで、

$$V = \begin{bmatrix} A & B & C & D & E & F \end{bmatrix}^T$$

$$S = \sum_{i=1}^n X_i X_i^T$$

ただし、

$$X_i = \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i y_i & y_i^2 & x_i & y_i & 1 \end{bmatrix}^T$$

$G$  を最小にするために、

$$S V + \lambda V = 0$$

を解けば良い。この問題は、 $S$  の固有値 ( $-\lambda$ ) と固有ベクトル ( $V$ ) を求める問題に帰着する。

## 4. 実験結果

### 4.1 数値実験

提案手法の有効性と精度を評価するために、CG により数値実験を行なった。合成された楕円の一部の例を図 4 に示す。図から円の中心は必ずしも楕円の中心とはならないことが分かる。

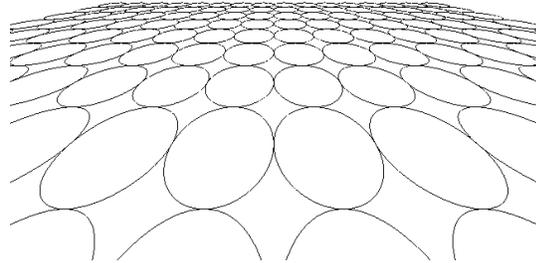


図 4 CG で合成した楕円の例

Fig. 4 The example of ellipses synthesized by CG

( $f = 200(\text{pixel}), \theta = 30(\text{degree}), R = 1.0(\text{m})$ )

下記の数値実験では、イメージセンサーの長さは 1/2 インチ、解像度は  $640 \times 480$  と仮定する。従って、1 画素の長さを 0.15875(mm) とする。

焦点距離  $f = 550$  画素、チルト角  $\theta = 55$  度の場合、 $R = 0.25, R = 0.50, R = 0.75$  メートル、円心位置を色々変わって、透視投影の楕円画像をそれぞれ合成した。合成された楕円のパラメータを推定し、その結果を用いて提案手法よりカメラのパラメータを推定した。推定誤差はそれぞれ表 1 から表 6 までに示す。

表1、表3、表5には、各種の半径の場合、焦点距離  $f$  の推定誤差をそれぞれ示す。表の一行目と一行目のデータは円心の位置（世界座標系の  $(X, Z)$ ）を示し、単位はメートルである。それ以外のデータは焦点距離  $f$  の推定誤差を示し、単位は画素であり、大きさは推定値と真値の差の絶対値である。

また、表2、表4、表6には、各種の半径の場合、チルト角  $\theta$  の推定誤差をそれぞれ示す。表の一行目と一行目のデータも円心の位置を示す。それ以外のデータはチルト角  $\theta$  の推定誤差を示し、単位は度であり、大きさは推定値と真値の差の絶対値である。その推定誤差の大きさは図5から図7まで高さで直観的に示す。

表1 推定された焦点距離の誤差 ( $R = 0.75(m)$ )  
Table 1 The estimation error of focal length( $R = 0.75(m)$ )

	Z=-1.4	-2.6
X=-1.2	1.4	2.74
-0.4	3.27	17.6
-0.0	non	non
0.4	1.89	2.11
1.2	0.24	2.89

表2 推定されたチルトの誤差 ( $R = 0.75(m)$ )  
Table 2 The estimation error of the tilt angle( $R = 0.75(m)$ )

	Z=-1.4	-2.6
X=-1.2	0.07	0.00
-0.4	0.09	0.21
-0.0	non	non
0.4	0.03	0.04
1.2	0.08	0.01

表3 推定された焦点距離の誤差 ( $R = 0.50(m)$ )  
Table 3 The estimation error of focal length( $R = 0.50(m)$ )

	Z=-1.2	-1.4	-2.4	-3.4
X=-1.8			2.71	2.33
-1.3	0.68	0.75	0.85	5.16
-0.8	0.71	0.58	2.84	3.52
-0.3	4.37	0.64	7.85	22.2
0.0	non	non	non	non
0.3	0.63	3.59	1.13	7.55
0.8	2.57	0.23	0.20	2.53
1.3	2.79	1.63	0.61	1.15
1.8			3.80	0.18

$R = 0.75$  メートル場合、焦点距離  $f$  の最大誤差が17画素、平均誤差が4画素程度であった。チルト角  $\theta$  の最大誤差が0.21度、平均誤差が0.066度程度であった。誤差が最大となる合成楕円画像を図8(a)に示す。

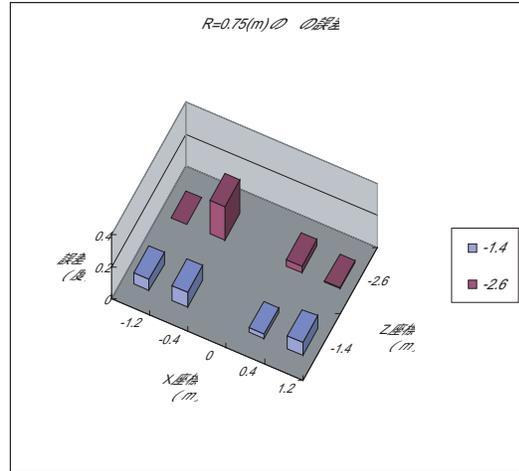


図5 推定されたチルトの誤差 ( $R = 0.75(m)$ )  
Fig. 5 The estimation error of the tilt angle( $R = 0.75(m)$ )

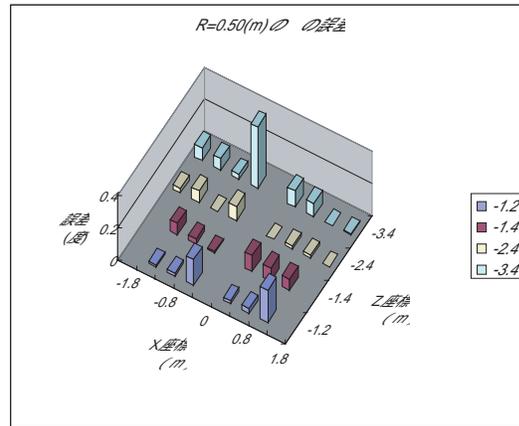


図6 推定されたチルトの誤差 ( $R = 0.50(m)$ )  
Fig. 6 The estimation error of the tilt angle( $R = 0.50(m)$ )

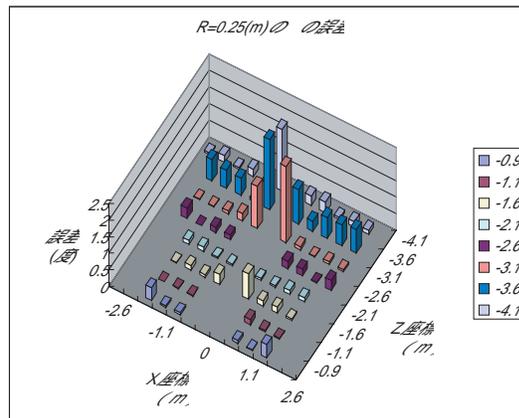


図7 推定されたチルトの誤差 ( $R = 0.25(m)$ )  
Fig. 7 The estimation error of the tilt angle( $R = 0.25(m)$ )

表 4 推定されたチルトの誤差 ( $R = 0.50(m)$ )  
Table 4 The estimation error of the tilt angle( $R = 0.50(m)$ )

	Z=-1.2	-1.4	-2.4	-3.4
X=-1.8			0.03	0.08
-1.3	0.01	0.07	0.07	0.07
-0.8	0.02	0.03	0.00	0.03
-0.3	0.16	0.01	0.09	0.38
0.0	non	non	non	non
0.3	0.02	0.10	0	0.1
0.8	0.03	0.08	0.02	0.08
1.3	0.20	0.07	0.02	0.00
1.3	0.16	0.00	0.07	0.16
1.8			0.00	0.01

この場合、画像上の楕円のサイズは  $211 \times 162$  画素であった。

$R = 0.50$  メートル場合、焦点距離  $f$  の最大誤差が 22 画素、平均誤差が 3 画素程度であった。チルト角  $\theta$  の最大誤差が 0.38 度、平均誤差が 0.055 度程度であった。誤差が最大となった合成楕円画像を図 8(b) に示す。このときの、画像上の楕円のサイズは  $127 \times 84$  画素であった。

$R = 0.25$  メートル場合、焦点距離  $f$  の最大誤差が 136 画素、平均誤差が 11 画素程度であった。チルト角  $\theta$  の最大誤差が 2.29 度、平均誤差が 0.30 度程度であった。誤差が最大となった合成楕円画像を図 8(c) に示す。この場合、画像上の楕円のサイズは  $90 \times 42$  画素で、楕円方程式の  $B$  の推定値は 0.03 であった。

上記のうち、誤差が大きくなる要因としては次の二つが考えられる。一つは、楕円のサイズが小さいため、量子化誤差の影響が顕著に表われ、フィッティング時の誤差が大きくなることである。もう一つは、 $B$  の推定値が小さいため、式 (16) の計算誤差が大きくなるということである。

以上の実験結果から、楕円の中心が画像の  $Y$  軸から離れ、楕円のサイズが大きいくほど、提案手法の精度が高い傾向があることが分かった。そして、楕円方程式の  $B$  の推定値を一定以上のものを選択して利用すれば、提案手法はカメラキョリブレーションの精度を充分保証できることが分かった。

#### 4.2 Homography 法との比較

焦点距離  $f = 220$  画素、チルト角  $\theta = 38$  度の場合、一辺の長が 2.0 メートルの正方形と内接している円の透視投影像 (サイズ =  $640 \times 480$ ) を合成した (図 9 に参照)。また、床面に対して垂直方向から見たその正方形の画像も合成した。

合成された 2 枚の画像上における正方形の 4 頂点を用いて、Homography 行列を求めた。それを分解して

表 5 推定された焦点距離の誤差 ( $R = 0.25(m)$ )  
Table 5 The estimation error of focal length( $R = 0.25(m)$ )

X:	Z=-0.9	-1.1	-1.6	-2.1	-2.6	-3.1	-3.6	-4.1
-2.6								1.82
-2.1					7.94	2.46	14.7	5.42
-1.6	2.95	2.69	2.89	0.36	1.04	4.17	9.53	1.96
-1.1	0.18	1.28	4.32	2.64	0.15	3.89	10.1	12.0
-0.6	2.36	2.44	2.71	3.77	2.65	16.5	9.11	0.15
-0.1			0.667	24.8		73.2	136	84.1
0.0	non	non	non	non	non	non	non	non
0.1			27.7	12.2		120	66.0	9.75
0.6	0.25	0.76	1.93	2.33	10.1	7.34	1.40	12.0
1.1	1.60	0.45	1.77	0.69	3.95	1.02	15.7	5.50
1.6	1.24	1.32	1.14	1.92	1.78	0.79	13.4	6.41
2.1					11.1	5.02	17.6	2.01

表 6 推定されたチルトの誤差 ( $R = 0.25(m)$ )  
Table 6 The estimation error of the tilt angle( $R = 0.25(m)$ )

X:	Z=-0.9	-1.1	-1.6	-2.1	-2.6	-3.1	-3.6	-4.1
-2.6								0.05
-2.1					0.31	0.02	0.64	0.02
-1.6	0.38	0.00	0.02	0.12	0.00	0.02	0.54	0.05
-1.1	0.05	0.02	0.14	0.13	0.16	0.09	0.51	0.22
-0.6	0.07	0.02	0.08	0.04	0.14	0.23	0.09	0.04
-0.1			0.31	0.05		1.26	2.11	1.85
0.0	non	non	non	non	non	non	non	non
0.1			0.76	0.05		2.29	1.03	0.28
0.6	0.09	0.16	0.16	0.05	0.22	0.10	0.30	0.32
1.1	0.03	0.05	0.18	0.13	0.20	0.02	0.63	0.07
1.6	0.40	0.03	0.05	0.12	0.02	0.08	0.62	0.16
2.1					0.30	0.06	0.70	0.12

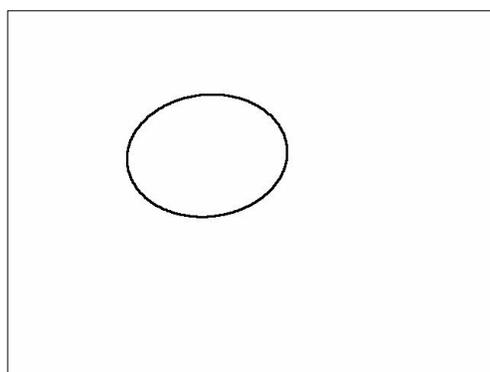
2 通りの結果 ( $\theta_1 = 37.88$  度,  $\theta_2 = 38.18$  度) が得られるが、正解であるパラメータを選ぶと、カメラのチルト角は  $\theta = 37.88$  度で、推定誤差は 0.12 度であった。しかし、これだけの情報からカメラの焦点距離は推定できない。

一方、内接した円の透視投影像を用いて推定されたカメラのチルト角は  $\theta = 37.99$  度で、推定誤差は 0.01 度であった。また、焦点距離は  $f = 206$  画素であった。

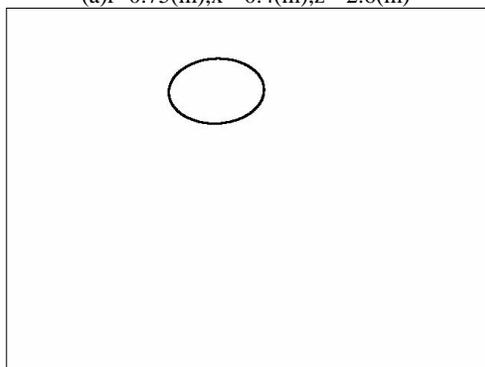
これによって、提案手法は Homography 以上の精度が得られることが分かった。

#### 4.3 実データによる実験

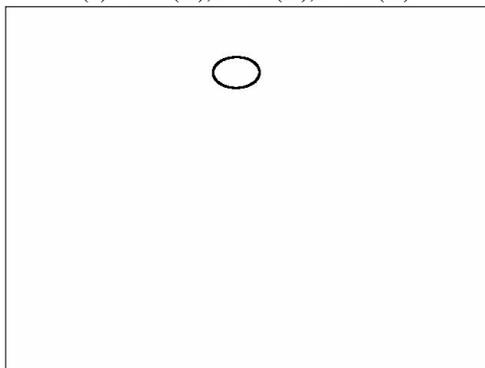
提案手法の実用的有効性を検証するために、赤と緑 2 色の LED を設置した手作りのラジコンの車をロボットのボディとして利用し、実験を行なった。提案した色検出法<sup>11)</sup>を利用して、床上に置かれたロボットの移動軌跡は、入力された動画像からラジコンの車上の赤色あるいは緑色の LED を検出・追跡することによって獲得する。ロボットのボディは円に沿って一週を移動したと判断された時点で、その画像系列から得られたロボットにおける移動の点列を使って、楕円のパラ



(a) $r=0.75(m),x=-0.4(m),z=-2.6(m)$



(b) $r=0.50(m),x=-0.3(m),z=-3.4(m)$



(c) $r=0.25(m),x=-0.1(m),z=-3.6(m)$

図 8 誤差が最大でした合成楕円画像

Fig. 8 Synthetic ellipse images which the error was maximum

メータを求め、カメラのパラメータを推定した。実験の風景は図 10 に示し、画像系列から得られたロボットの移動軌跡の例を図 11 に示し、フィットされた楕円例は図 12 に示す。

#### 4.4 円らしさによる精度評価

30 組 (7 種類のチルトの角度と 22 種類の焦点距離の組合せ) の実データ点列を用いてカメラの焦点距離  $f$  とチルト角  $\theta$  の値を推定した。推定値の精度を評価するために、推定された  $f$  と  $\theta$  を用いて、真のカメラ

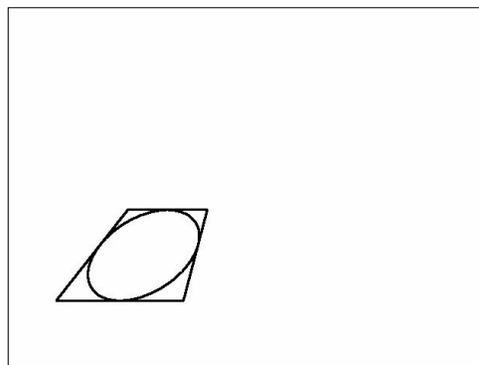


図 9 提案手法と Homography 法の比較用画像

Fig. 9 An image for comparison of our method and Homography method



図 10 実験風景

Fig. 10 Experiment scenery

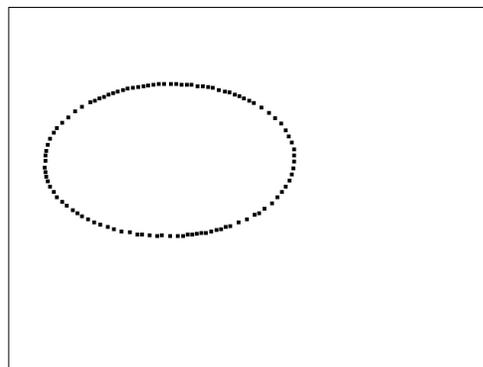


図 11 画像系列から得られたロボットの移動軌跡の例

Fig. 11 The example of a robot's move locus from an image series

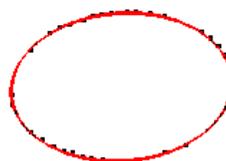


図 12 フィットされた楕円例

Fig. 12 The fitted ellipse

より観測された画像から真上の仮想カメラより観測された画像への変換 Homography 行列を求めた。求められた行列を用いて、実データ点列を仮想画像への変換を行った。変換された仮想データ点列の円らしさを評価するために、仮想データ点列を使って、ぶたたびこの場合の楕円のパラメータを求めた。求めた楕円の方程式の一例は、

$$1.000x^2 - 0.00029xy + 1.007y^2 + 0.000289x - 0.00095y - 0.9965 = 0$$

となり、楕円の長軸は  $a = 275.987$ 、短軸は  $b = 275.500$  であり、短軸と長軸の比は  $b/a = 0.998$  であった。

これによって、床面に対して垂直方向から観測している仮想カメラから見た点列は円に充分近く、提案手法の復元精度が充分高いことは確認できた。

## 5. ま と め

本稿では、外部カメラで自己位置同定をしながら床面を移動する車両型センサレスロボットシステムのためのカメラキャリブレーション法を提案した。車両型ロボットが平面上に描いた真円と、外部カメラから観測された楕円像との幾何学関係に基づいて、床面を基準としたカメラの視線方向および、カメラの焦点距離を求めるアルゴリズムを導出した。数値実験から、楕円方程式の  $B$  の推定値を一定以上のものを選択して利用すれば、提案手法は充分高い精度が保証できること、Homography 法以上の精度が得られることが分かった。実環境に適用して得られた実験結果から提案手法の実用的有効性も確認した。

提案手法には、以下のメリットがある。

- 幾何学的あるいは光学的特性が既知の道具が不要なので、道具の保管・運送上の手間を省くことが可能になる。
- 単一の円の透視投影像が一枚あれば、簡単な計算でカメラのパラメータを曖昧さ無く求めることができる。また、2次元平面上の点と画像上の点の対応関係を求める必要がないため手作業による対応付けが不要であり、カメラキャリブレーションの自動化に利用することが可能である。

以上のことより、提案手法はカメラの移動があるシステムに幅広く利用可能である。

現在、このキャリブレーション手法はロボットコントロールシステムの初期化動作としてインプリメントしており、任意の場所にカメラとロボットを置くだけで、自動的にキャリブレーションが終了し、コン

トロールが可能になる。今後、画像中心の自動推定、radial distortion の補正、カメラ光軸周りの回転角度のキャリブレーションなどについても検討を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は科学研究費基盤 (A)(2)12308016 の支援を受けている。

## 参 考 文 献

- 1) Meng, X., Li, H. and Hu, Z.: A New Easy Camera Calibration Technique Based on Circular Points, *Proc. British Machine Vision Conference*, University of Bristol, Editors: M.Mirmehid and B.Thomas. Sep. (2000).
- 2) Wang, G., Wu, F. and Hu, Z.: Novel Approach to Circular Points Based Camera Calibration,
- 3) Kim, J.S., Kim, H.W. and Kweon, I.S.: A Camera Calibration Method using Concentric Circles for Vision Applications, *Proc. of Asian Conf. on Computer Vision* pp. 23–25. (2002).
- 4) Kim, J.S., and Kweon, I.S.: Camera Calibration using Projective Invariance of Concentric Circles, *Proc. of Workshop on Image Processing and Image Understanding* (In Korean) (2001).
- 5) Yang, C., Sun, F. Hu, Z.: Planar Conic Based Camera Calibration, *Proc. of the Int. Conf. on Pattern Recognition* (2000).
- 6) Long, Q.: Conic Reconstruction and Correspondence From Two Views, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.18, No.2, pp. 151–160, (1996).
- 7) Sukthankar, R., Stockton, R. and Mullin, M.: Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems, *Proc. of Int. conf. on Computer Vision* pp. 247–253 (2001).
- 8) Holt, R.J. and Netravali, A.N.: Camera Calibration Problem: Some New Result, *CVIU*, No.54, Vol.3, pp. 368–383, (1991).
- 9) Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.11, pp. 1330–1334, (2000).
- 10) Sturm, P. and Maybank, S.: On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications, *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 432–437, (1999).
- 11) 和田俊和: 最近傍識別器を用いた色ターゲット検出-「らしさ」に基づかない識別とコンピュータビジョンへの応用, 情報処理研究会報告, 2002-CVIM-134, pp. 17–24 (2002).