

回転方式によるカメラパラメータの算出

深田陽司

三菱電機産業システム研究所
〒661 尼崎市塚口本町8-1-1

パラメータ測定用の専用物体を使用せず、カメラシステムの回転機構を利用した1台のカメラによるキャリブレーション方式を提案する。移動ロボットに搭載されたカメラを想定し、パラメータ算出のための観測すべき対象であるワールド座標軸は机など固定備品のカドや部屋の隅を採用する。そのため移動ロボットの作業（興味ある物体の認識やその位置・姿勢の決定など）対象となるシーンから、ワールド座標軸シーンへカメラを回転・焦点距離を変更して撮像し、このシーンを用いてパラメータを算出した後順次戻して行って、作業対象シーンのキャリブレーションを行う。最後に数種類の回転角度・平行移動距離による実験を行い、それらの数値がどの程度正確に測定できるかの相対的精度について報告する。

Calculation of Camera Parameters
by Rotation Mechanism

Youji FUKADA

Industrial Electronics & Systems Development Lab., Mitsubishi Electric Co.
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661, Japan

In this paper, a camera calibration method utilizing rotation mechanism of a camera system is described. It has been developed for a camera mounted on a mobile robot. 3 edges facing at a corner of a room or a equipment such as a desk are adopted as the 3 World axes. First, our method calculates the 3 rotational parameters using these 3 edges. Second, the translational 3 parameters are calculated using equal or more than 2 points that are assumed to exist near the corner. Hereafter, these values are recalculated using rotated angles between the corner scene and the initial one of objects to be recognized. Last, experiments are executed in order to ensure the efficiencies of our method.

1. まえがき

物体の位置・姿勢の決定や情景理解の研究は、カメラに関するパラメータは既知のものとして構築されている。理論の構築のみであれば実際の値をしらなくてもよいが、実画像に適用しようとするればパラメータを実測しなければならない。

カメラパラメータを算出するための研究は、測定用の専用物体を使用し精度を向上させる手法の開発が主眼であった^{(1)・(2)}。カメラが固定されている状況においては一度測定すればよく、これらの手法は高精度であり有効である。ところで移動ロボットを考えると対象となる情景は次々と変わり、カメラ固有以外のパラメータは動的に変化するので、その都度キャリブレーションを行なわねばならない。従来方式を利用しようとするれば、測定用物体を自ら運搬し直面している情景の中に設置する必要が生じる。しかも設置された物体に対する関係しか分からない。

このような問題点に対して、ステレオ画像を利用し撮像されている情景を利用する方式が提案されている。この方式による手法では、左右画像における数組の対応点を利用して、誤差の含まれる計算結果を繰り返的に改善し、高い精度の算出結果を得ている。特に文献⁽³⁾では、ステレオ対応探索手法を利用することによって、誤差に強い手法を提案している。

ところで、人間は単眼でも情景を立体的にみることができ、単眼視による3次元情報の復元の研究が報告されている^{(4)・(5)}。更に、2つのカメラの間の基線長がそれ程は大きくとれない移動ロボットでは、単眼による情景理解は重要な要素技術である。

本論文では、パラメータ測定用の専用物体を使用せず、カメラシステムの回転機構を利用した単眼の方式を提案する。移動ロボットに搭載されたカメラを想定し、ワールド座標軸は部屋の隅や机など固定備品のカドを採用する。そのため移動ロボットの作業（興味ある物体の認識やその位置・姿勢の決定）対象となるシーンから、ワールド座標軸シーンへカメラを回転・焦点距離を変更して撮像し、このシーンを利用してパラメータを算出した後順次戻して行って、作業対象シーンのキャリブレーションを行なう。本方式の基本的展開はすでに報告されているが⁽⁶⁾、ここではその導出が画像処理誤差に弱いことを解析し、カメラの回転中心とカメラ座標系の原点間の変位ベクトルを計測して定数とした手法での良好な実験結果を報告する。

2. 問題設定

2.1 座標系

本論文では6つの座標系を設定する。即ち、ワールド座標系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 、第1カメラ座標系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 、第2カメラ座標系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 、第3カメラ座標系 $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ 、第4カメラ座標系 $O_4 X_4 Y_4 Z_4$ 、画像座標系 $O_i U V$ である。そのうちの4つを図1に示す。なお、カメラによる撮像など各カメラ座標系に共通することを述べる時には単純にカメラ座標系 $O_c X_c Y_c Z_c$ と呼ぶ。

これらの座標系は全て左手系で定義されており、点やベクトルがどの座標系で表現されているかを区別するために上に述べた座標系の順に、 (\cdot) 、 $\langle \cdot \rangle$ 、 $\langle \cdot \rangle$ 、 $[\cdot]$ 、 $[\cdot]$ 、 $\{\cdot\}$ の表記を用いる。本論文では平行移動も線型で扱えるように式の展開には同次座標表現を使用し、単純に点やベクトルを表す時には普通座標表現を用いることとする。

2.2 カメラシステム

まずカメラシステムについて述べる。レンズ中心をカメラ座標系の原点として画像面は光軸（ Z_c 軸）に直交して、前方の焦点距離の位置に設置されているとする。光軸と画像面との交点を画像原点とし、 U 軸と X_c 軸、 V 軸と Y_c 軸は平行とする。カメラはシステムに固定の点（以後、回転中心と呼ぶ）を中心にして、自身の軸方向まわりに回転できる機構をもつ。図2に Y 軸まわりの回転を示す。本論文では回転は、全て軸の正方向からみて時計方向とする。焦点距離の変更は図3に示すように、撮像面はカメラシステムに対して不動のままレンズの Z_c 軸方向の移動によって行なわれ、その移動距離は測定できるものとする。

カメラパラメータには、カメラシステムに固有のものとして撮像時に動的に変化するものの2種類がある。前者には画像中心（画像原点）、撮像素子の横と縦の長さ及びその比（アスペクト比）があり、前もって測定ないしは計算できる⁽⁶⁾。後者には焦点距離（レンズ中心と撮像面との距離）、カメラの回転中心からレンズ中心へのベクトル（以後回転変位ベクトルと呼ぶ）、ワールド座標系に対する回転・平行移動がある。以下にいくつかのパラメータを定義する。なお添字 i は第 i カメラ座標系におけるパラメータであることを指し、第 i カメラ座標系で撮像した画像を第 i 画像と呼ぶ。

f_i : 焦点距離 (mm)

f_{ix} : X_c 軸方向の焦点距離 (画素)

$f_{i,v}$: Y_c 軸方向の焦点距離 (画素)
 $rat = f_{i,x}/f_{i,v}$: アスペクト比 (無単位)
 t_i : カメラ回転中心から O_i へのベクトル (mm)
 (以後第 i 回転変位ベクトルと呼ぶ)

T_i : O_w から O_i への平行移動ベクトル (mm)

カメラ座標系と画像座標系は点 $P = [X, Y, Z]$ が
 $p = \{u', v'\}$ に撮像されたとすると、

$$u = u', v = v' \cdot rat \quad (1)$$

とおくと以下の式

$$u = f_{i,x} X/Z, v = f_{i,v} Y/Z \quad (2)$$

によって関係づけられる。ここで $[P]$ は点 P のカメラ座標系における表現を表す。なお以下の議論において、画像座標値 u', v' が与えられた時、(1)の関係による u, v を使用する。

2.3 第1カメラ座標系

認識などの作業対象となる物体を撮像しているカメラ座標系を第1カメラ座標系と呼ぶ。第1カメラ座標系は図1に示すように、ワールド座標系から $T_1 = (T_x, T_y, T_z)$ 平行移動しており、 Y_1 軸、 X_1 軸、 Z_1 軸まわりに β ($-\pi \leq \beta < \pi$)、 α ($-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$)、 γ ($-\pi \leq \gamma < \pi$) 回転している。この時、点 P 及びベクトル E は回転行列を $R_{1,w}$ 、平行移動行列を $T_{1,w}$ (これらの行列の具体的な表現は下段に示す) とすると、 $(P) = \langle P \rangle R_{1,w} T_{1,w}$, $(E) = \langle E \rangle R_{1,w}$ (3) の関係を持つ。

2.4 第2カメラ座標系

第2カメラ座標系は、観測すべきワールド座標軸やそのワールド位置座標が既知の点 (以後、参照点と呼ぶ) が撮像できるよう、回転中心を中心にして第1カメラ座標系を Y_1 軸まわりに ν 、 X_1 軸まわりに μ 回転したカメラ座標系である。これらの回転角は与えられるものとする (例えば自走ロボットでは、第1カメラ座標系とワールド座標系の間のおおよその関係は分かっており、 ν と μ を決めることができる)。焦点距離は不変である (つまり、 $f_2 = f_1$)。

図2に示すように、カメラ座標系原点と回転中心との位置関係は不変なので回転変位ベクトルのそれぞれの座標系における大きさは同じである、つまり $t_1 = \langle t_x, t_y, t_z \rangle$ の時 $t_2 = \langle t_x, t_y, t_z \rangle$ である。

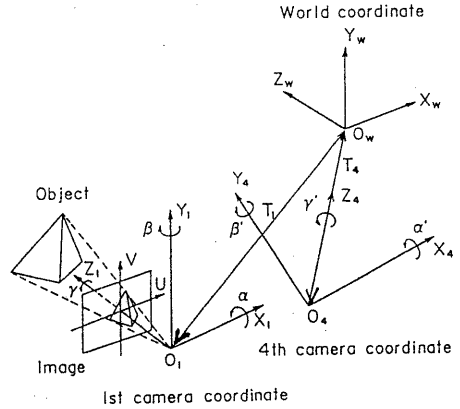


図1 座標系の設定

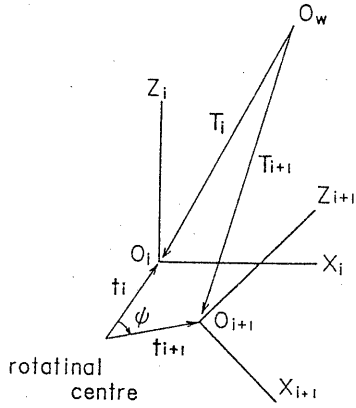


図2 Y軸まわりの回転

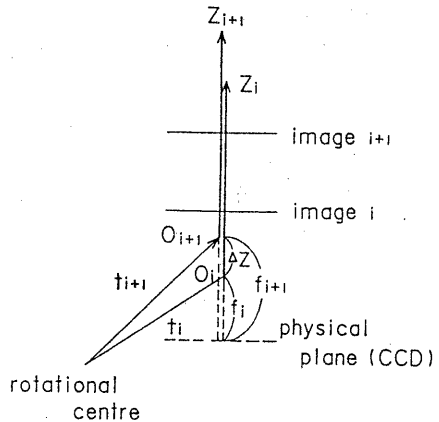


図3 焦点距離の変更

$$T_{1,w} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix} \quad R_{1,w} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & 0 \\ -\cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

よって第1カメラ座標系と第2カメラ座標系とは回転行列を R_{mn} とすると

$$\begin{aligned} \langle P \rangle T_{12} &= \langle P \rangle T_{12} R_{mn}, \\ \langle E \rangle &= \langle E \rangle R_{mn} \end{aligned} \quad (4)$$

の関係にある。ここで、

$$T_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} \quad R_{mn} = \begin{bmatrix} \cos \nu & 0 & -\sin \nu & 0 \\ \sin \mu \sin \nu & \cos \mu & \sin \mu \cos \nu & 0 \\ \cos \mu \sin \nu & -\sin \mu & \cos \mu \cos \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.5 第3カメラ座標系

第3カメラ座標系は、第2カメラ座標系の姿勢を保ちつつ、ワールド座標軸や参照点に焦点をあわせた座標系である。本論文では参照点は第3画像に撮像されていると仮定する。

焦点距離を変更することはレンズ中心の Z_c 方向への平行移動のみだから、第2カメラ座標系の原点から第3の原点へのベクトルを $t_{23} (= t_3 - t_2)$ とすると、 $t_{23} = \langle 0, 0, \Delta z \rangle = [0, 0, \Delta z]$ であり、2つの座標系の間には

$$\begin{aligned} \langle P \rangle &= [P] T_{32}, \quad \langle E \rangle = [E] \quad (5) \\ \text{の関係がある。ここで、} \quad T_{32} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta z & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

焦点距離は図3に示すように $f_3 = f_2 + \Delta z$ である。

2.6 第4カメラ座標系

ワールド座標系の原点が Z_4 軸上にあるのっているカメラ座標系を第4カメラ座標系と呼ぶ。第4カメラ座標系は、回転中心を中心にして第3カメラ座標系を Y_3 軸方向まわりに ψ 、 X_3 軸方向まわりに ϕ 回転して得られたとする。焦点距離は第3カメラ座標系と同じ($f_4 = f_3$)である。 ψ と ϕ については、ワールド原点の像を画像原点に一致させるフィードバック制御機能が具備されていればこの機能を利用してきめてもよいし、本論文と同様に回転機構のみを具備したカメラシステムを用いて、 ψ は2枚、 ϕ は1枚の画像観測により算出できることも報告されている⁽⁷⁾。ここでは、文献⁽⁷⁾の手法によって第4画像を撮像する。

2.4と同様に、 $t_3 = [t_x', t_y', t_z']$ とすると、 $t_4 = [t_x'', t_y'', t_z'']$ である。すると、 $t_3 = t_2 + t_{23}$ の両辺を(5)を用いて第2または第3カメラ座標表現で表すと、回転変位ベクトルの要素には以下の関係

$$t_x' = t_x, \quad t_y' = t_y, \quad t_z' = t_z + \Delta z' \quad (6)$$

が成り立つことが分かる。

第3と第4のカメラ座標系間には

$$\begin{aligned} [P] T_{34} &= [P] T_{34} R_{43}, \\ [E] &= [E] R_{43} \end{aligned} \quad (7)$$

の関係がある。ここで、

$$T_{34} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x'' & t_y'' & t_z'' & 1 \end{bmatrix} \quad R_{43} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi & 0 \\ \sin \phi \sin \psi & \cos \phi & \sin \phi \cos \psi & 0 \\ \cos \phi \sin \psi & -\sin \phi & \cos \phi \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第4カメラ座標系とワールド座標系の間には(3)

と同様の

$$\begin{aligned} (P) &= [P] R_{4w} T_{4w}, \quad (E) = [E] R_{4w} \quad (8) \\ \text{の関係がある。ここで、} \quad T_4 &= (T_x', T_y', T_z') \text{ と} \\ \text{おく時、} \quad T_{4w} &\text{は} T_{1w} \text{における} T_x, T_y, T_z \text{を} T_x', \\ T_y', T_z' \text{に、} \quad R_{4w} &\text{は} R_{1w} \text{における} \alpha, \beta, \gamma \text{を} \\ \alpha', \beta', \gamma' \text{にそれぞれおきかえた行列である。} \end{aligned}$$

第1カメラ座標系における変数 $\alpha, \beta, \gamma, T_x, T_y, T_z, f_{1x}$ (または f_1)が本論文で算出すべきパラメータであり(2)~(8)の関係式を展開して解く。

3. パラメータ算出式の導出

3.1 回転角の算出

第4カメラ座標系の回転は、ワールド座標軸の第4画像における像 l_i ($i=1, 3$)の画像座標表現を $l_i: a_i'U + b_i'V = 0$ とすると、 α', β', γ' は以下の式

$$\begin{aligned} \tan \gamma' &= -b_2/a_2 \\ \tan \beta' &= \pm \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2) (a_2 b_3 - a_3 b_2)}{\sqrt{(a_2 a_3 + b_2 b_3) (a_1 b_2 - a_2 b_1)}} \\ \sin \alpha' &= \frac{\tan \beta' (a_2 a_3 + b_2 b_3)}{(a_2 b_3 - a_3 b_2)} \quad (9) \end{aligned}$$

で算出され、それぞれ一意に決定できる⁽⁶⁾。ここで、 $a_i = a_i' \text{rat}$, $b_i = b_i'$ ($i=1, 3$)である。

第3カメラ座標系のワールド座標系に対する回転行列を R_{3w} とおくと、(7)と(8)より、

$$R_{3w} = R_{43}^{-1} R_{4w} \quad (10)$$

第1カメラ座標系のワールド座標系に対する回転行列は(3), (4), (5), (7)より $(E) = [E] R_{43} R_{mn} R_{1w}$ だから(8)との比較により、

$$R_{1w} = R_{mn}^{-1} R_{43}^{-1} R_{4w} \quad (11)$$

によって算出できる。

R_{4u} は既に決定されているので、計測又は算出されている回転角 ψ, ϕ, ν, μ を (11) に代入することによって R_{1u} が求まる。すると α の存在範囲が限定されているので、 R_{1u} の (3, 2) 要素より α が一意に決定し、 β, γ もそれぞれ R_{1u} の 3 行、2 列より一意に決定できる (R_{3u} も同様に各回転角を計算できる)。

3. 2 平行移動と焦点距離の算出

3. 2. 1 第4カメラ座標系の平行移動と焦点距離

参照点 P のワールド表現を (X)、第4画像座標値を $\{u', v'\}$ として (8) の点に関する式を展開すると (2) より

$$\begin{aligned} u &= f_{4x} (x - T_4 \cdot r_1) / (z - T_4 \cdot r_3) \\ v &= f_{4x} (y - T_4 \cdot r_2) / (z - T_4 \cdot r_3) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 r_i を R_{4u}^{-1} の左上 3×3 行列の i 列を要素とするベクトルとし、 $x = X \cdot r_1, y = X \cdot r_2, z = X \cdot r_3$ とする。

第4画像ではワールド原点は画像原点に撮像されているから、 $T_4 \cdot r_1 = 0, T_4 \cdot r_2 = 0$ である。よって (12) の2つの式より f_{4x} と $T_4 \cdot r_3$ に関する線型式

$$\sqrt{u^2 + v^2} = f_{4x} \sqrt{x^2 + y^2} / (z - T_4 \cdot r_3) \quad (13)$$

が求まる。よって、原点以外の2つの参照点 $P_i = (X_i)$ の第4画像内の像 $p_i = \{u_i', v_i'\}$ ($i = 1, 2$) を用いると、 $T_4 \cdot r_3$ と f_{4x} は2つの線型式を解くことによって以下のごとく

$$\begin{aligned} f_{4x} &= d_1 d_2 (z_2 - z_1) / (d_1 D_2 - d_2 D_1) \\ T_4 \cdot r_3 &= (d_1 D_2 z_1 - d_2 D_1 z_2) / (d_1 D_2 - d_2 D_1) \end{aligned} \quad (14)$$

と算出できる。ここで、

$$\begin{aligned} x_i &= X_i \cdot r_1, y_i = X_i \cdot r_2, z_i = X_i \cdot r_3, \\ d_i &= \sqrt{u_i'^2 + v_i'^2}, D_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}. \end{aligned}$$

よって平行移動 T_4 は

$$\begin{aligned} (T_x', T_y', T_z', 1) \\ = (0, 0, T_4 \cdot r_3, 1) R_{4u} \end{aligned} \quad (15)$$

と算出できる。

3. 2. 2 第3カメラ座標系の平行移動と焦点距離

第3カメラ座標系の平行移動 T_3 は図2に示すように以下の式

$$T_3 = T_4 + t_3 - t_4 \quad (16)$$

で算出できる。(16)において (T_4) はすでに算出されているので、 $(t_3), (t_4)$ が算出できれば T_3 のワールド表現 (T_3) が算出できる。

参照点 P の第4カメラ座標表現を (X)、第3画像座標値を $\{u', v'\}$ として (7) の点に関する式を展開すると (2) より

$$\begin{aligned} u &= f_{3x} (x - X) / (z - Z), \\ v &= f_{3x} (y - Y) / (z - Z) \end{aligned} \quad (17)$$

の関係にある。ここで、 r_i は R_{43} の左上 3×3 行列の i 列を要素とするベクトルであり、 $x = X \cdot r_1, y = X \cdot r_2, z = X \cdot r_3, X = t_3 \cdot (i_1 - r_1), Y = t_3 \cdot (i_2 - r_2), Z = t_3 \cdot (i_3 - r_3)$ 。

(17) の2つの式の比をとると、(X) は (8) の前式によって計算できるので、X と Y に関する線型式

$$vX - uY = vx - uy \quad (18)$$

が求まり、2つの参照点を用いて X, Y が算出できる。

すると、 f_{3x} と Z は (14) と同様の式によって算出できるので、 $[t_3]$ (結果として $[t_4]$ も) は $[t_3] = (X, Y, Z, 1) (I - R_{43})^{-1}$ (19) と計算できる。これらのワールド表現は (7), (8) より、

$$(t_4) = [t_4] R_{4u} \quad (20)$$

$$(t_3) = [t_3] R_{43}^{-1} R_{4u} \quad (21)$$

のように算出できる。

3. 2. 3 第2カメラ座標系の平行移動と焦点距離

第2カメラ座標系の平行移動 T_2 は図2より、

$$T_2 = T_3 - t_{23} \quad (22)$$

だから (t_{23}) を算出すればよい。ここで Δz は計測されているので $[t_{23}]$ は既知であり、(21) による (t_3) と同様にして計算できる。焦点距離は、 $f_2 = f_3 - \Delta z$ より容易に算出できる。

3. 2. 4 第1カメラ座標系の平行移動と焦点距離

第1カメラ座標系の平行移動 T_1 は図2より、

$$T_1 = T_2 + (t_1 - t_2) \quad (23)$$

だから $(t_1), (t_2)$ を算出すればよい。ところで $t_2 = t_3 - t_{23}$ であり、右辺のワールド表現は既に算出されているので、 (t_2) は計算できる。 t_2 の第2カメラ座標表現 $\langle t_2 \rangle$ は、(5), (7), (8) より導出される以下の式

$$\langle E \rangle = (E) R_{4u}^{-1} R_{43} \quad (24)$$

を用いれば計算できるので、要素の大きさが同じである t_1 の第1カメラ座標表現 $\langle t_1 \rangle$ が定まる。よって (3) を用いて (t_1) を算出することができる。

第1カメラ座標系の焦点距離は、2. 4 で述べたように第2カメラ座標系のそれと同じである。

4. 算出式の解析と新算出式

4.1 T_4 と f_{4x} の解析

(14)による2つの変数の算出は、その分母が小さい場合には誤差が大きく影響し不安定となる。例えば、 $T_4 = (0, 0, T_2')$ 、 $R_{4u} = I$ で2点として $X_1 = (X, Y, Z)$ 、 $X_2 = (-X, Y, Z)$ を考えると、

$x_1 = X$ 、 $x_2 = -X$ 、 $y_1 = y_2 = Y$ 、 $z_1 = z_2 = Z$ となるので(12)より、 $u_2 = -u_1$ 、 $v_2 = v_1$ となりその結果、 $d_1 = d_2$ 、 $D_1 = D_2$ なので(14)の分母は0となってしまう。画像処理による誤差を考えると、このような2点でなくても同様のことが起こり得るし、本論文のように情景の中の点を利用する手法では参照点としては数多くなく適切な点を選べないので、(14)は誤差に弱い算出式となってしまう(5.で述べる実験でも確認されている)。

4.2 T_4 の新算出法

文献⁽⁷⁾では本論文と同じシステム構成で、注目点を画像中心に撮像する(即ち第4画像をえる)ためのカメラシステム回転角を算出する際に、焦点距離も求められている。しかもその算出式は、画像処理誤差に対して強いと報告されている。そこで、本節では焦点距離は既知として他のカメラパラメータを算出する。

変数 $T_4 \cdot r_3$ は(13)より、

$$T_4 \cdot r_3 = z - f_{4x} \sqrt{x^2 + y^2} / \sqrt{u^2 + v^2} \quad (25)$$

となるので、原点以外の参照点が1つあれば算出できる。ここで更に(25)を解析すると、画像処理誤差の影響は参照点の像の画像原点からの距離に依存していることが分かる。

次に2つの参照点を利用することを考える。 P_1 と P_2 に対する(12)の u に関する2つの式の差をとると変数 $T_4 \cdot r_3$ は、

$$T_4 \cdot r_3 = \{ f_{4x} (x_2 - x_1) + (u_1 z_1 - u_2 z_2) \} / (u_1 - u_2) \quad (26)$$

と算出できる。

同様に v に関する2つの式の差をとると、

$$T_4 \cdot r_3 = \{ f_{4x} (y_2 - y_1) + (v_1 z_1 - v_2 z_2) \} / (v_1 - v_2) \quad (27)$$

と算出できる。ここで誤差による影響を小さくするために、 $|u_1 - u_2|$ または $|v_1 - v_2|$ の大きい方で算出された値を $T_4 \cdot r_3$ として採用する。

参照点の像が適当にばらついて分布している場合は、(26)または(27)の方が(25)よりも安定し

て算出できる。また一般的に、2つの参照点の組からの算出値の数は、同じ個数の参照点に対して1つの点からの算出値の数よりも多いので、平均をとることにより誤差の影響を小さくできる。

4.3 T_3 と f_{3x} の解析

まず(19)における変数 X 、 Y を算出するための(18)をみると、2つの参照点による2本の直線が平行に近ければ、その解(即ち交点)は誤差が大きい。次に変数 Z は(14)と同様の式で算出されるので、4.1での解析と同じく算出式の分母が小さい時には不安定となる。

これらの不安定な結果を用いて(19)を計算する際さらなる問題が発生する。つまり、遠方にあるワールド原点を第3及び第4画像で撮像しているため、これら2つのカメラ座標系間の回転角 ψ と ϕ は一般的に小さい(文献⁽⁷⁾によると、ワールド原点が前方約1mに存在する時、数度である)。すると回転行列 R_{43} は単位行列に近いものになるので、 $(I - R_{43})^{-1}$ の各要素は大きな値をもち、 X 、 Y 、 Z の誤差が拡大されてしまう。例えば $\psi = -4$ 度、 $\phi = 6$ 度の時、 $(I - R_{43})$ の要素は 10^{-3} のオーダーであり、その逆行列の要素は $10^5 \sim 10^7$ のオーダーである。それ故、回転変位ベクトルは不安定となってしまう、その結果として第3カメラ座標系の平行移動は安定して算出できない。

4.4 回転変位ベクトルの計測

3章では回転変位ベクトルは変数として、カメラパラメータ算出式を導出した。これらの理論式はより汎用的であるが、前節で解析したように画像処理誤差をとまなう現実では誤差の影響を大きく受ける。ここで本来の目的は(16)による T_3 の算出であり、回転変位ベクトルの算出はそのための手段である。本節では回転変位ベクトルについて考察する。

本論文ではカメラシステムは図4に示すように、回転ステージの上に2つのゴニオメータを重ね、それに支柱をたてカメラ部を水平に固定している。回転ステージは Y 軸まわりの回転に、上のゴニオメータは X 軸まわりの回転に使用している。下のゴニオメータは撮像面の U 軸が水平になるように、 Z 軸を事前に調整するために設置している。実験中は回転しない。

ゴニオメータの回転中心は回転面の真上3.7mmの位置にあり(カタログより)、支柱は中心を通っているので、この点がカメラシステムの回転中心である。カメラ部のレンズ中心はメーカーに問い合わせれば確認

でき、その他（例えばレンズ中心と支柱間のZ距離）はメジャーで計測できる。その結果1 m前方に焦点を合わせた場合回転変位ベクトルは $[t_3] = [0, 80, 77.1]$ mmと容易に定数とすることができる。なお、無限遠に焦点を合わせた場合でもレンズ中心はZ方向に-0.6 mm移動するだけであり、焦点を合わせる位置が多少変動してもその誤差は小さい。

5. 実験結果

4. 4で述べた構成のカメラシステムを、傾けた台（別のゴニオメーター）の上に設置し実験を行った。カメラ部のレンズはFUJINON-TV CF25, CCD撮像部はSONYDC-37を使用している。画像の横縦は、512×480画素である。カメラシステムは、座標軸と平行な軸まわりに回転できるように調整されており、この状態で画像中心とアスペクト比を計測した⁽⁶⁾。

$(J_c, I_c) = (249.510, 229.736)$, $rat = 0.9876$ である。本論文での画像座標値は全て画像中心を画像原点にした値である。

5.1 実験

3シリーズの実験を行った。ワールド座標情景として、実験1と2は(80, 70, 60) mmの石膏の直方体を、実験3はキャビネットのカドの部分情景を採用している。実験では焦点距離の変更、即ち Δz の測定は困難なので、変更せず一定($\Delta z = 0$)である。つまり、第2画像と第3画像は同一である。

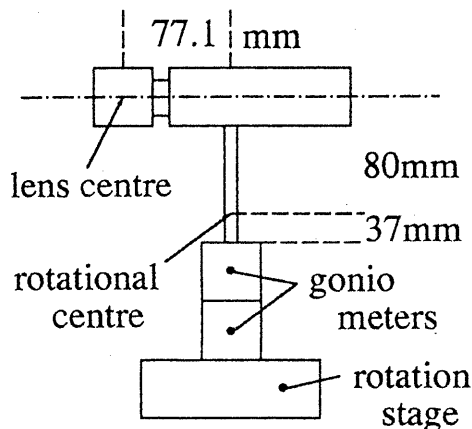


図4 カメラシステム

実験2では図5に示すように、カメラは直方体を右斜め上からみている。参照点は7点存在しており $P_1 \sim P_7$ のどれか1点をワールド原点、原点からの直方体のエッジをワールド座標軸とする。つまり、第1カメラ座標系では直方体の全景を撮像し、1枚の第1画像に対して4組のカメラキャリブレーションを行う。この実験を、カメラの初期状態は同一にしておいて直方体の位置・姿勢を変化させて4通りの実験を行った。即ちカメラパラメータを16回測定した。直方体の4通りの位置・姿勢は以下のa~dである。

- a: キャビネット(台)の前面左上カドから(280, 0, 100) mmの位置・水平垂直姿勢
- b: aから(-60, 0, 60) mm平行移動
- c: aの位置で(-13.5, 14.5, 0)度回転
- d: aと同じ位置・姿勢

カメラの絶対的位置・姿勢を測定することは困難なので、aの P_1 を原点とするワールド座標系を基準座標系として、直方体のサイズ及びb~dの数値を用いて16回の実験結果を基準座標系に対する値に換算してその精度を比較する。実験2では第1画像にワールド原点が撮像されているので、 $\nu = \mu = 0$ である。

実験1は直方体を左斜め上からみしており、実験2と同様に16回のカメラパラメータ測定を行った。

実験3では図6に示すように、キャビネットの前面左上カドをワールド原点とし、そのへりを座標軸としている。参照点は同図に示すように、収納部のエッジの延長線と座標軸との交点の2つと壁の腰板上の1点を採用しており、原点を含めて計4点である。第1カメラ座標系は実験2と同じ位置・姿勢であり、 $\mu = 0$ で ν を-10~-20度の間で変更して6回の実験を行った。これらの結果は上に述べたように、実験2の基準座標系の値に変換してその精度比較を行う。

5.2 考察

表1にこれらの実験結果それぞれの平均と分散を示す。3つの実験とも分散は小さく、精度よい結果がえられていることが分かる。

実験2と3は第1カメラ座標系が同じなのでその結果を比較すると、回転角は3軸まわりとも1度以内、平行移動は(10.4, 15.6, 2.9) mmの差異が生じている。これは実験3における P_5 が(14, 0, 0) mm、 P_6 が(0, -32, 0) mmの位置にあって、原点からの画像座標がそれぞれおおよそ{15, 5}画素、{2, -50}画素しかなく(27)式による変数の計算に誤差が影響したものと思われる。

7. むすび

カメラシステムの回転機構を利用したキャリブレーション方式を提案した。まずカメラの回転中心が任意の点の場合について、7つの動的パラメータを算出する解析式を導出した。次にこれらの式が誤差に強くはないことを解析し、計測した回転中心を用いて誤差に強い算法を展開した。最後に実験を行い、本方式の有効性を確認した。実験では回転で1度以内、平行移動で10mm前後の精度がえられており、ロボット自身の位置認識やハンドにあそびをもつ物体の掴み作業など実用には充分耐えうると思われる。さらに最も重要な点として、本方式では動的パラメータの算出には専用の物体でなく情景中の点を利用するので、これまでの方式よりも適用範囲がひろい。今後は、算出されたカメラパラメータを用いて実情景の3次元情報復元などに適用し本手法の効果を確かめる予定である。

文 献

- (1) T. Echigo: "A camera calibration technique using three sets of parallel lines", *Machine Vision and Applications*, 3, 3, pp.159-167 (Summer 1990).
- (2) L.L. Wang and W.H. Tsai: "Computing camera parameters using vanishing-line information from a rectangular parallelepiped," *ibid*, pp.129-141 (Summer 1990)
- (3) 富田文明, 高橋裕信: "ステレオカメラのセルフキャリブレーション", *情報処理*, 31, 5, pp.650-659 (1990-5).
- (4) T. Shakunaga and H. Kaneko: "Perspective angle transform: principle of shape from angles", *Int. J. Computer Vision*, 3, 3, pp.239-254 (Sep. 1989).
- (5) 深田陽司: "線特徴からの3次元情報復元と物体認識", *信学技報*, PRU90-50, pp. 69-76 (1990-7).
- (6) 深田陽司: "測定用専用物体を使用しないカメラキャリブレーション", *情処研報*, CV 71-4, pp. 1-10 (1991-3).
- (7) 深田陽司: "注目点を画像原点に投影させるためのカメラシステム回転角の算出法", *情処研報*, CV 78-3, pp. 17-24 (1992-5).

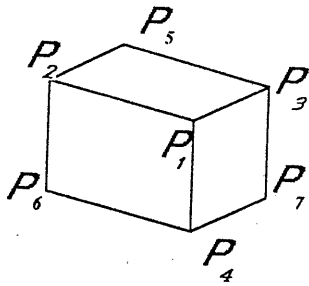


図5 測定対象物体 (実験2)

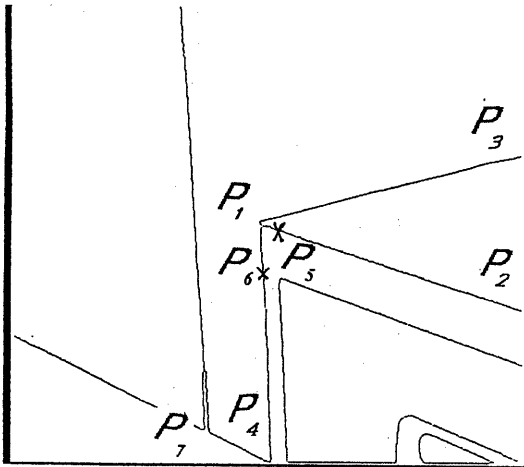


図6 情景 (実験3)

表1 カメラパラメータ

		実験1	実験2	実験3
f_{ix}	平均	2028.3	2013.2	2003.3
	分散	36.3	24.3	24.7
α	平均	13.326	13.002	13.504
	分散	0.017	0.056	0.002
β	平均	46.637	-36.890	-35.992
	分散	0.405	0.191	0.121
γ	平均	0.484	0.526	1.202
	分散	0.118	0.058	0.015
T_x	平均	-650.9	668.0	657.6
	分散	95.6	84.8	30.7
T_y	平均	272.0	278.7	294.3
	分散	22.4	22.0	5.7
T_z	平均	-716.4	-773.6	-776.5
	分散	97.3	75.8	77.5