

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

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

画像中の興味ある部分を視野の中心にすえて見る方式が提案され、3次元情報復元問題やオプティカルフローの計算において研究されている。これらの研究は、焦点距離が既知であることやカメラはその原点であるレンズを中心にして回転できるといった仮定のもとでの理論展開が中心である。しかし、この方式を物理的に実現しようとする、実際にカメラを回転して画像中の注目点を画像原点に撮像できなければならない。即ち、カメラ固有のパラメータ以外のパラメータは未知であるとの条件のもとで、注目点の画像座標値を使用してのカメラ回転角が算出できなければならない。本稿では画像処理において避けえない観測誤差に強い、カメラ回転角の算法を提案する。最後に、精度測定のための実験を行い、本算法の効果を確かめた。

Calculation of Camera Rotation Angles
for a Point to be Projected on the Image Origin

Youji FUKADA

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

In this paper, a method that calculates angles by which the camera is rotated for an attended point to be projected on the image origin is described. It has been developed for the calibration of a camera mounted on a mobile robot, 6 degrees of freedom recovery problem and so on. First, algebraic equations derived so far are analyzed, and it is shown that they are influenced by noises. Second, robust equations are presented using approximate image coordinates of a rotated point. This approximation is done by assuming rotation angles are small. Last, lots of experiments are executed in order to ensure the robustness of our calculation method.

1 まえがき

視覚を具備し情景認識や物体認識を実現する知的なシステムを構築するために、コンピュータビジョン等の分野で優れた研究が数多くなされてきた[4][5]。しかしこれらの研究成果の多くは、カメラの位置・姿勢や焦点距離などが既知であることを前提としており、実画像に適用しようとするればカメラパラメータを測定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、3軸に平行な直線を多数面上に描いた測定用の専用物体を用いての、精度を向上させる手法の開発が主眼であった[1][2]。しかしこの方式では測定用物体上に設定された座標系に対する変位が測定できるだけであり、固定されたワールド座標系に対するカメラパラメータを算出するためには、ワールド座標系に対する測定用物体の位置・姿勢が既知でなければならない。それ故、移動ロボットに搭載されたカメラにこの方式を利用しようとする問題が生じ適用できない。つまり、直面している情景画像の中に位置・姿勢の分かっている測定用物体が必ず撮像されていなければならない、このような状況は現実には不可能である。

そこで移動ロボットに搭載されたカメラを想定し、測定用物体ではなく情景画像中に撮像されていると期待できる、建物の角や部屋の隅、机などの固定された備品の角をワールド座標系とする方式が研究されている[3]。注視すべき部分を画像中心に撮像する方式は、6自由度復元問題[4]や、オプティカルフロー計算[5]でも利用されているが、そこでは焦点距離が既知であることや回転がカメラ座標系の原点であることが前提となっている。

文献[3]では、カメラを物理的にその軸まわりに回転することによってワールド座標系原点を画像原点に撮像し、焦点距離を含めたカメラパラメータを算出する解析式を導出している。更に、この操作に必要なカメラの回転すべき角の算出式も導き出されている。しかしこれらの算出式は理論式であり、画像処理において問題となる各種の誤差に弱いことが懸念される。

本稿ではワールド座標系原点などの特定の注目点を画像原点に撮像するための、カメラシステムの回転量を安定して算出する手法を述べる。

2 問題設定

2.1 座標系

文献[3]での議論との混乱を避けるため同じ呼びかたの座標系を設定する。即ちワールド座標系の原点などの注目点を、画像の一般的座標位置及び画像原点に撮像しているカメラ座標系をそれぞれ第3カメラ座標系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 、第4カメラ座標系 $O_4X_4Y_4Z_4$ と呼ぶ。さらに第3カメラ座標系から第4カメラ座標系まで、Y軸まわり及びX軸まわりに回転している座標系をそれぞれ総称してY回転座標系、X回転座標系と呼ぶ。画像座標系を O_1UV とする。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 $O_cX_cY_cZ_c$ と呼ぶ。

これらの座標系は全て左手系で定義されており、それぞれの座標系における点やベクトルの表現を区別するために上に述べた座標系の順に $[\dots]$, (\dots) , 「 \dots 」, 『 \dots 』, $\{\dots\}$ の表記を用いる。

2.2 カメラシステム

図1 aに示すように、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、自身の軸まわりに回転できる機構をもつ。回転は全て軸の正方向からみて時計方向とする。

以下に本稿で使用する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。

$$\begin{aligned} f_{ix} &: X_c \text{ 軸方向の焦点距離 (pixel)}, \\ f_{iy} &: Y_c \text{ 軸方向の焦点距離 (pixel)}, \\ \text{rat} &= f_{ix}/f_{iy} : \text{アスペクト比 (無単位)}, \\ t_i &: \text{回転中心から } O_i \text{ へのベクトル (mm)}, \\ & \text{(以後第 } i \text{ 回転変位ベクトルと呼ぶ)}. \end{aligned}$$

カメラ座標系と画像座標系は、点 $P = [X_c, Y_c, Z_c]$ が $p = [x_c, y_c, f_i] = \{u_c', v_c'\}$ に撮像されているとすると、以下の式

$$\begin{aligned} u_c' &= f_{ix}X_c/Z_c, & v_c' &= f_{iy}Y_c/Z_c, \\ u_c &= u_c', & v_c &= v_c' \text{rat} \end{aligned} \quad (1)$$

によって関係づけられる。ここで $[P]$ は $[P]$, (P) , 「 P 」, 『 P 』のどれかを表す。

ここで一般性を失うことなく、システムに対する前提条件として $t_i = [t_x', t_y', t_z']$ とするとき、

$Z_c \gg X_c, Y_c > t_y', t_z' \gg t_x'$ が成り立つとする。

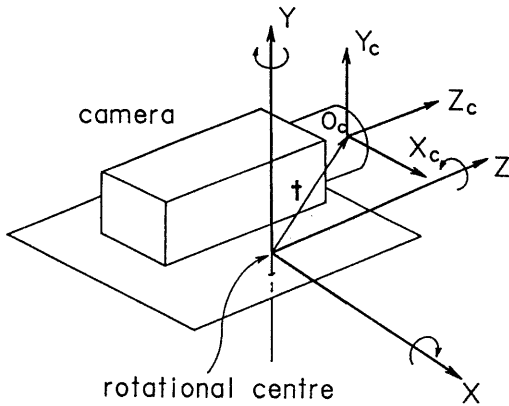
2.3 第3カメラ座標系

注目点Pを画像原点以外の一般的位置に撮像している座標系である。Pの3次元位置座標値及び第3画像座標値を $[X_3, Y_3, Z_3]$, $\{u_3', v_3'\}$ とする。また、第3回転変位ベクトルを $t_3 = [t_x', t_y', t_z']$ とする。

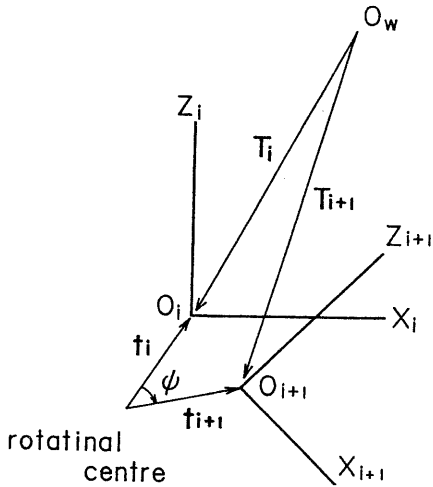
第3カメラ及び画像座標系の座標値の間には(1)より

$$u_3 = f_{3x} X_3 / Z_3, \quad v_3 = f_{3x} Y_3 / Z_3 \quad (2)$$

の関係がある。



a. ふかん図



b. Y軸まわりの回転

図1. カメラの回転

2.4 Y回転座標系

注目点を画像原点に撮像するための第1ステップであり、第3カメラ座標系を回転中心を中心にして Y_3 軸まわりに回転した座標系である。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 t_y の大きさは t_3 と同じである。つまり図1bに示すように、 $t_y = [t_x', t_y', t_z']$ である。回転角を $\Delta\psi_n$ とすると、これら2つの座標系の間には

$$[P] = [P] T_{3n} R_{n3}^{-1} T_{3n}^{-1} \quad (3)$$

の関係がある。ここで、

$$T_{3n} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x' & 0 & t_z' & 1 \end{pmatrix}, \quad R_{n3} = \begin{pmatrix} \cos\Delta\psi_n & 0 & -\sin\Delta\psi_n & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\Delta\psi_n & 0 & \cos\Delta\psi_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Pとその像の座標値をそれぞれ $[X_n, Y_n, Z_n]$, $\{u_n', v_n'\}$ とすると、これらの座標値の間には(1)より

$$u_n = f_{3x} X_n / Z_n, \quad v_n = f_{3x} Y_n / Z_n \quad (4)$$

の関係がある。

(3)を展開するとY回転座標系での座標値は

$$X_n = X_3 \cos\Delta\psi_n + t_x' (\cos\Delta\psi_n - 1) - (Z_3 + t_z') \sin\Delta\psi_n \quad (5)$$

$$Y_n = Y_3 \quad (6)$$

$$Z_n = (X_3 + t_x') \sin\Delta\psi_n + Z_3 \cos\Delta\psi_n + t_z' (\cos\Delta\psi_n - 1) \quad (7)$$

と具体的に表わせる。

2.5 X回転座標系

注目点を画像原点に撮像するための第2ステップであり、注目点をY軸上に撮像しているY回転座標系を回転中心を中心にして X_c 軸まわりに回転した座標系である。回転変位ベクトルは前項で述べたように同じ大きさなので、回転角を $\Delta\phi_c$ とするとこれら2つの座標系の間には

$$[P] = [P] T_{nc} R_{cn}^{-1} T_{nc}^{-1} \quad (8)$$

の関係がある。ここで、

$$T_{nc} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & t_y' & t_z' & 1 \end{pmatrix}, \quad R_{cn} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta\phi_c & \sin\Delta\phi_c & 0 \\ 0 & -\sin\Delta\phi_c & \cos\Delta\phi_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Y回転座標系及び $\Delta\phi_c$ 回転したX回転座標系におけるPの座標値をそれぞれ、「 $0, Y_n, Z_n$ 」, 「 $0, v_n'$ 」, 「 $0, Y_c, Z_c$ 」, 「 $0, v_c$ 」とすると、これらの座標値の間には(1)より

$$v_n = f_{3x} Y_n / Z_n, \quad v_c = f_{3x} Y_c / Z_c \quad (9)$$

の関係がある。

(8)を展開するとX回転座標系での座標値は

$$Y_c = Y_n \cos \Delta \phi_c + t_w' (\cos \Delta \phi_c - 1) + (Z_n + t_z') \sin \Delta \phi_c \quad (10)$$

$$Z_c = -(Y_n + t_w') \sin \Delta \phi_c + Z_n \cos \Delta \phi_c + t_z' (\cos \Delta \phi_c - 1) \quad (11)$$

と具体的に表わせる。

2. 6 第4カメラ座標系

第4カメラ座標系は注目点を画像原点に撮像している座標系であり、第3カメラ座標系を回転中心を中心にして Y_c 軸方向まわりに ψ 、 X_c 軸方向まわりに ϕ 回転して得られたとする。回転変位ベクトルの大きさは同じである、つまり $t_d = [t_x', t_w', t_z']$ である。

すると、第3と第4のカメラ座標系間には

$$[P] T_{34} = [P] T_{34} R_{43} \quad (12)$$

の関係がある。ここで、

$$T_{34} = R_{43} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x' & t_w' & t_z' & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi & 0 \\ \sin \phi \sin \psi & \cos \phi & \sin \phi \cos \psi & 0 \\ \cos \phi \sin \psi & -\sin \phi & \cos \phi \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3 パラメータの算出式[3]

本節では文献[3]の結果を本稿での議論に必要な程度に簡潔に述べ、観測誤差の影響を考察する。

3. 1 カメラ回転角 ψ と焦点距離の算出式

第3カメラ座標系を、回転中心を中心にして Y_3 軸まわりに $\Delta\psi_a$ 、 $\Delta\psi_b$ 回転し撮像する。この時Pの像の座標値をそれぞれ「 u_n', v_n' 」, 「 u_b', v_b' 」とすると、Pの像がV軸上にあるまでの角度 ψ は $T = \tan \psi$ を変数とする以下の2次式

$$AT^2 + BT + C = 0 \quad (13)$$

を解くことによって算出される。ここで、

$$A = \{ (Z_3/Y_3 + t_z'/Y_3)^2 - (t_x'/Y_3)^2 \},$$

$$B = -2 (u_3/v_3 + t_x'/Y_3) (Z_3/Y_3 + t_z'/Y_3),$$

$$C = \{ (u_3/v_3 + t_x'/Y_3)^2 - (t_x'/Y_3)^2 \}$$

であり、係数における変数 t_x'/Y_3 と $Z_3/Y_3 + t_z'/Y_3$ は

$$(t_x'/Y_3, t_z'/Y_3 + Z_3/Y_3) = (a, b) R_{aB}^{-1} \quad (14)$$

と計算される。ここで、

$$R_{aB} = \begin{pmatrix} 1 - \cos \Delta \psi_a & 1 - \cos \Delta \psi_b \\ \sin \Delta \psi_a & \sin \Delta \psi_b \end{pmatrix},$$

$$a = u_3/v_3 \cos \Delta \psi_a - u_n/v_n,$$

$$b = u_3/v_3 \cos \Delta \psi_b - u_b/v_b.$$

更に、変数 f_{3x} と t_z'/Y_3 は、

$$(1/v_n - 1/v_b) f_{3x}$$

$$= (u_3/v_3 + t_x'/Y_3) (\sin \Delta \psi_a - \sin \Delta \psi_b)$$

$$+ (t_z'/Y_3 + Z_3/Y_3) (\cos \Delta \psi_a - \cos \Delta \psi_b) \quad (15)$$

及び、

$$t_z'/Y_3 = (u_3/v_3 + t_x'/Y_3) \sin \Delta \psi_a$$

$$+ (t_z'/Y_3 + Z_3/Y_3) \cos \Delta \psi_a - f_{3x}/v_n \quad (16)$$

と計算できる。

3. 2 カメラ回転角 ϕ の算出式

Pの像がV軸上にあるまで ϕ だけ回転したY回転座標系におけるPの座標値を、「 $0, Y_n, Z_n$ 」, 「 $0, v_n'$ 」とする。この座標系をX軸まわりに $\Delta\phi_c$ 、 $\Delta\phi_b$ 回転した時のPの画像座標値を「 $0, v_c'$ 」, 「 $0, v_b'$ 」とすると、Pの像が画像原点に一致するまでの角度 ϕ は $T = \tan \phi$ を変数とする以下の2次式

$$AT^2 + BT + C = 0 \quad (17)$$

を解くことによって算出される。ここで、

$$A = \{ (1 + t_w'/Z_n)^2 - (t_w'/Z_n)^2 \},$$

$$B = 2 (1 + t_w'/Z_n) (v_n/f_{3x} + t_w'/Z_n),$$

$$C = \{ (v_n/f_{3x} + t_w'/Z_n)^2 - (t_w'/Z_n)^2 \}$$

であり、係数における変数 t_w'/Z_n は

$$(t_w'/Z_n, t_z'/Z_n) = (c, d) R_{cD}^{-1} \quad (18)$$

と計算される。ここで、

$$R_{cD} (1,1) = f_{3x} (1 - \cos \Delta \phi_c) - v_c \sin \Delta \phi_c,$$

$$R_{cD} (1,2) = f_{3x} (1 - \cos \Delta \phi_b) - v_b \sin \Delta \phi_b,$$

$$R_{cD} (2,1) = -f_{3x} \sin \Delta \phi_c - v_c (1 - \cos \Delta \phi_c),$$

$$R_{cD} (2,2) = -f_{3x} \sin \Delta \phi_b - v_b (1 - \cos \Delta \phi_b),$$

$$c = f_{3x} (v_n/f_{3x} \cos \Delta \phi_c + \sin \Delta \phi_c)$$

$$+ v_c (v_n/f_{3x} \sin \Delta \phi_c - \cos \Delta \phi_c),$$

$$d = f_{3x} (v_n/f_{3x} \cos \Delta \phi_b + \sin \Delta \phi_b)$$

$$+ v_b (v_n/f_{3x} \sin \Delta \phi_b - \cos \Delta \phi_b).$$

3. 3 算出式に対する考察

すべてのパラメータの計算に直接的及び間接的に関与する変数 t_x'/Y_3 と $Z_3/Y_3+t_z'/Y_3$ の算出式(14)を考察する。前者の変数 t_x'/Y_3 の算出式は、

$$R_{AB}^{-1} = \frac{1}{|R_{AB}|} \begin{pmatrix} \sin\Delta\psi_B & -1+\cos\Delta\psi_B \\ -\sin\Delta\psi_A & 1-\cos\Delta\psi_A \end{pmatrix}$$

だから、

$$t_x'/Y_3 = \frac{1}{|R_{AB}|} \begin{pmatrix} (u_3/v_3\cos\Delta\psi_A - u_A/v_A) \sin\Delta\psi_B \\ -(u_3/v_3\cos\Delta\psi_B - u_B/v_B) \sin\Delta\psi_A \end{pmatrix} \quad (19)$$

である。

ところでシステムに対する仮定より、(19)の分子は分母よりかなり小さい値となる(5で述べる実験システムでは、 t_x' はほぼ0 mmに構築することができている)。ここで $\Delta\psi_A$ 、 $\Delta\psi_B$ は小さいので $t_i = \tan\Delta\psi_i$ 、($i=A, B$) に関するテーラー展開を適用すると分母の行列式は

$$\begin{aligned} |R_{AB}| &= (1-\cos\Delta\psi_A) \sin\Delta\psi_B - (1-\cos\Delta\psi_B) \sin\Delta\psi_A \\ &= \cos\Delta\psi_A \cos\Delta\psi_B \\ &\quad \{ (\sqrt{1+t_A^2}-1) t_B - (\sqrt{1+t_B^2}-1) t_A \} \\ &= \cos\Delta\psi_A \cos\Delta\psi_B t_A t_B (t_A - t_B) \end{aligned} \quad (20)$$

と展開される。

例として $\Delta\psi_A = -1^\circ$ 、 $\Delta\psi_B = -2^\circ$ を(20)に代入すると、 $|R_{AB}| = 1.064 \times 10^{-5}$ となる。すると上に述べたように、分子はこれより小さく(19)の計算過程で桁落ちの恐れが生じるので、誤差に対して不安定となる。

一方、後者の変数 $Z_3/Y_3+t_z'/Y_3$ の算出式も同様に展開し、Y回転画像におけるV値はほぼ同じであるという4. 1の結果を利用すると

$$|R_{AB}| (Z_3/Y_3+t_z'/Y_3) = \cos\Delta\psi_A \cos\Delta\psi_B t_A t_B (t_A - t_B) f_{3x}/2v \quad (21)$$

となる。ここで、 $v = (v_3+v_A+v_B)/3$ である。その結果この変数は(14)により

$$Z_3/Y_3+t_z'/Y_3 = f_{3x}/v \quad (22)$$

のごとく安定して算出されるが、上に述べたように前者の変数 t_x'/Y_3 が不安定なので、(14)による計算結果は ψ の算出式(13)には使えない。

さらに(15)で算出される焦点距離は t_x'/Y_3 が正しく得られている場合でもV値はほぼ同じなので、 $1/v_A - 1/v_B$ は誤差に弱くて f_{3x} は不安定となってしまう、(18)を利用しての(17)による ϕ も安定して得られない。

4 誤差を考慮したパラメータ算出近似式

4. 1 Y回転画像における点のV座標値

Y回転座標系における点のV座標値について考察する。(2)と(4)の後者の2つの式の差をとり(6)を代入すると

$$v_A - v_B = f_{3x} Y_3 (1/Z_A - 1/Z_B) \quad (23)$$

となる。

ここで(7)は、 $\Delta\psi_A$ が小さいので $t_A = \tan\Delta\psi_A$ に関するテーラー展開を適用すると

$Z_A = \{ Z_3 + (X_3+t_x') t_A - t_z' t_A^2/2 \} / \sqrt{1+t_A^2}$ と展開でき、 $1/Z_A = \{ 1 - (X_3+t_x') t_A/Z_3 + t_A^2/2 \} / \sqrt{1+t_A^2}$ と展開できる。この結果を(23)に代入し $t_x'/Z_3 \doteq 0$ の仮定と(2)を用いて整理すると、

$$\begin{aligned} v_A - v_B &= f_{3x} Y_3 \{ 1 - (X_3+t_x') t_A/Z_3 + t_A^2/2 \} / \sqrt{1+t_A^2} \\ &\quad - \{ 1 - (X_3+t_x') t_B/Z_3 + t_B^2/2 \} / \sqrt{1+t_B^2} \\ &= f_{3x} Y_3 \{ 1 - t_A X_3/Z_3 + t_A^2/2 \} \\ &\quad - \{ 1 - t_B X_3/Z_3 + t_B^2/2 \} \\ &= f_{3x} Y_3 \{ (t_A - t_B) X_3/Z_3 + (t_A^2 - t_B^2)/2 \} \end{aligned} \quad (24)$$

となる。

ここで例として、 $f_{3x} = 2000$ 、 $u_3 = 100$ 、 $\Delta\psi_A = 1^\circ$ とすると、 $u_3/f_{3x} = 0.05$ 、 $t_A/2 = 0.009$ となることから分かるように、(24)式の右辺の第2、3項は第1項の1に比べて非常に小さい。よって、

$$v_A = v_B \quad (25)$$

とみなせる。

4. 2 Y回転画像における点のU座標値

前項と同様に、Y回転座標系における点PのU座標値について考察する。

(4)の前者に(5)と(7)を代入して $t_A = \tan\Delta\psi_A$ に関するテーラー展開を行った後、 $1/Z_A = \{ X_3 - (Z_3+t_z') t_A - t_x' t_A^2/2 \} / \{ Z_3 + (X_3+t_x') t_A - t_z' t_A^2/2 \}$ を利用してさらにテーラー展開を行って整理すると

$$\begin{aligned} X_A/Z_A &= \{ X_3 - (Z_3+t_z') t_A - t_x' t_A^2/2 \} / \{ Z_3 + (X_3+t_x') t_A - t_z' t_A^2/2 \} \\ &= \{ X_3 - (Z_3+t_z') t_A \} / \{ Z_3 + (X_3+t_x') t_A \} \\ &= (X_3/Z_3) \{ 1 - (Z_3/X_3 + X_3/Z_3) t_A + t_A^2 \} \end{aligned} \quad (26)$$

と近似できる。よって(2)と(4)の前の2つの式の差は

$$\begin{aligned} (u_3 - u_A) / t_A &= f_{3x} (X_3/Z_3 - X_A/Z_A) / t_A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= f_{3x} (X_3/Z_3) \{ (Z_3/X_3 + X_3/Z_3) - t_n \} \\
&= f_{3x} \{ 1 + (X_3/Z_3)^2 - (X_3/Z_3) t_n \} \\
&= f_{3x} \{ 1 + (u_3/f_{3x})^2 - (u_3/f_{3x}) t_n \} \quad (27)
\end{aligned}$$

となる。

ここで例として変数に4. 1項と同じ値を代入すると、(27)の右辺の第2、3項は第1項の1に比べて非常に小さい。よって(27)は

$$(u_3 - u_n) / t_n = f_{3x} \quad (28)$$

と簡略化される。

4. 3 X回転画像における点のV座標値

X回転座標系における点のV座標値について考察する。

(9)の後に(10)と(11)を代入して $t_c = \tan \Delta \phi_c$ に関するテーラー展開を行った後、1) $(Y_n + t_v')$ t_c / Z_n を利用してさらにテーラー展開を行って整理すると Y_c / Z_c

$$\begin{aligned}
&= \{ Y_n + (Z_n + t_z') t_c - t_v' t_c^2 / 2 \} / \\
&\quad \{ Z_n - (Y_n + t_v') t_c - t_z' t_c^2 / 2 \} \\
&= \{ Y_n + (Z_n + t_z') t_c \} / \{ Z_n - (Y_n + t_v') t_c \} \\
&= (Y_n / Z_n) \{ 1 + (Z_n / Y_n + Y_n / Z_n) t_c + t_c^2 \} \quad (29)
\end{aligned}$$

となる。よって、(9)の2つの式の差は

$$\begin{aligned}
&(v_c - v_n) / t_c \\
&= f_{3x} (Y_c / Z_c - Y_n / Z_n) / t_c \\
&= f_{3x} (Y_n / Z_n) \{ (Z_n / Y_n + Y_n / Z_n) + t_c \} \\
&= f_{3x} \{ 1 + (Y_n / Z_n)^2 + (Y_n / Z_n) t_c \} \\
&= f_{3x} \{ 1 + (v_n / f_{3x})^2 + (v_n / f_{3x}) t_c \} \quad (30)
\end{aligned}$$

ここで4. 1と同様に、(30)の右辺の第2、3項は第1項の1に比べて非常に小さい。よって(30)は

$$(v_c - v_n) / t_c = f_{3x} \quad (31)$$

と簡略化される。

4. 4 パラメータ算出近似式

4. 4. 1 焦点距離

4. 2で示したように焦点距離は、第3画像ともう1枚のY回転画像を用いて算出できる。

一般的には(27)を変形した以下の2次式

$$f_{3x}^2 - \{ u_3 t_n + (u_3 - u_n) / t_n \} f_{3x} + u_3^2 = 0 \quad (32)$$

を解くか、より簡略には

$$f_{3x} = (u_3 - u_n) / t_n \quad (33)$$

によって算出される。

4. 4. 2 カメラ回転角 ψ

(27)において $u_n=0$ となる回転角が求める ψ だから、 ψ は $T = \tan \psi$ を変数とする以下の2次式

$$u_3 T^2 - (f_{3x} + u_3^2 / f_{3x}) T + u_3 = 0 \quad (34)$$

を解くことによって算出される。2つのTは同符号であり、回転によって視野からはずれないことを考えると ψ は2つ存在し、共に第1象限か共に第4象限である。2つのうちどちらかの決定は、(28)の簡略式による $T' = u_3 / f_{3x}$ から求められる ψ' に近い方を選択する。

4. 4. 3 カメラ回転角 ϕ

(30)において $v_n=0$ となる回転角が求める ϕ だから、 ϕ は $T = \tan \phi$ を変数とする以下の2次式

$$v_n T^2 + (f_{3x} + v_n^2 / f_{3x}) T + v_n = 0 \quad (35)$$

を解くことによって算出される。 ψ の場合と同様に ϕ は2つ存在し、共に第1象限か共に第4象限である。2つのうちどちらかの決定は、(31)の簡略式による $T' = -v_n / f_{3x}$ から求められる ϕ' に近い方を選択する。

5 実験

5. 1 実験システム構成

実験は図2に示すカメラシステムを用いて行った。回転ステージと2つのゴニオメータを重ねた回転部に支柱をたて、その上にカメラ部を設置している。レンズはFUJINON-TV CF25, CCD撮像部はSONY DC-37を使用している。画像の横縦サイズは、512 X 480である。

カメラシステムは、カメラ座標軸と平行な軸まわりに回転できるよう前もって調整されており、この状態で画像中心 (J_c, I_c) とアスペクト比を計測した[2]。 $(J_c, I_c) = (249.510, 229.736)$, $rat=0.9876$ である。本稿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。

本稿での議論では回転変位ベクトルは変数としてしているが参考のためにしるすと、回転中心は上のゴニオの回転面上 37mm のところにあり、おおよそ $[0.0, 80.0, 77.1]$ である。この値は、ゴニオメータのカタログや製造メーカーから得たレンズ主点に関する情報を利用してメジャーで計測したものである。

5. 2 実験結果

測定対象物体は図3に示す、80 x 70 x 60 mmの直方体であり4つの頂点P1~P4を注目点とした。つまり1枚の第3画像で、焦点距離、回転角 ψ と ϕ の算出を4組行う。各組は前の組の実験が終ると、カメラシステムを初期の第3カメラ座標系にもどして実行する。焦点距離は(28)を用いた。また各算出角だけ回転したY回転画像及び第4画像における注目点の画像座標値を測定した。画像処理は、ソーベル微分、2値化、細線化、直線点列抽出、直線近似を順に実行した後、直線の交点を算出し注目点の画像座標値とした。

この実験を、カメラの初期状態は同じで、対象物体を以下のように平行移動・回転し4回行った。その結果、実験は16回行ったことになる。

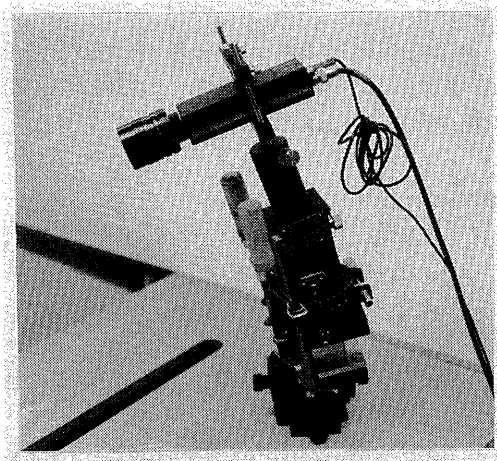


図2. カメラシステム

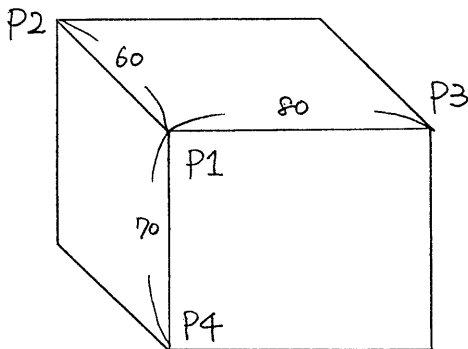


図3. 測定対象物体

実験1: 適当な位置(前方約1m)・水平及び垂直姿勢

実験2: 実験1から(20.0, 0.0, 40.0)mm平行移動

実験3: 実験1から(-13.5, -14.5, 0.0)度回転

実験4: 実験3の後、実験1と同じ位置・姿勢

表1には、表3の角度だけ回転した画像における注目点の画像座標値を示す。4で述べたように、焦点距離と回転角 ψ 、 ϕ は2枚の画像を観測することにより算出できるが、実験では誤差に対してさらに強くするため、Y回転画像を -2° 毎に6枚、X回転画像を -1° 毎に7枚撮像し、それぞれ2枚ずつの組から算出されるN個全部の平均(表2)に近い $2/3N$ 個を平均(表3)している。Nは焦点距離と ψ は15、 ϕ は21である。

2つの表から分かるように、これらの値は分散も小さく近似している。つまり2枚の画像でも誤差に対して充分強いことが読み取れる。なお、各表は上から順に実験1から実験4における結果を表わし、左端は各実験における注目点Piを指す。

表1. 注目点の画像座標値

	Y回転画像		第4画像	
	U	V	U	V
P1	0.671	-83.8	0.043	1.026
P2	-1.435	-57.5	-1.107	-0.002
P3	-0.098	-50.8	-0.267	-0.480
P4	-0.149	-215.1	-0.682	1.575
P1	-0.554	-56.2	-0.555	-1.789
P2	0.079	-36.6	-0.228	0.568
P3	-0.529	-30.5	-0.673	0.106
P4	-1.408	-186.9	-2.054	1.697
P1	-0.595	-88.3	-0.961	0.416
P2	0.443	-45.2	0.153	0.023
P3	0.868	-51.1	0.972	-0.932
P4	0.836	-213.6	0.838	0.325
P1	0.964	-79.5	0.468	-0.200
P2	1.207	-55.4	1.283	-0.464
P3	-0.798	-49.3	-0.767	0.762
P4	-0.291	-212.8	-0.526	1.591

表2. パラメータの算出値 (全点)

	焦点距離(f_{3x})		ψ (度)		ϕ (度)	
	平均	分散	平均	分散	平均	分散
P1	2039.3	484.0	-4.014	0.0020	2.319	0.0001
P2	2040.3	936.3	-6.240	0.0013	1.595	0.0000
P3	2038.3	267.2	-0.831	0.0010	1.403	0.0001
P4	2032.1	531.2	-3.987	0.0025	5.995	0.0007
P1	2032.6	418.9	-4.663	0.0006	1.566	0.0001
P2	2032.9	519.5	-6.786	0.0009	0.990	0.0005
P3	2028.9	205.6	-1.542	0.0005	0.827	0.0004
P4	2025.3	502.9	-4.628	0.0008	5.213	0.0008
P1	2037.4	137.1	-3.226	0.0003	2.427	0.0005
P2	2040.9	171.5	-6.013	0.0002	1.229	0.0004
P3	2028.6	61.2	-0.936	0.0002	1.388	0.0008
P4	2028.7	30.4	-3.966	0.0001	5.972	0.0006
P1	2038.3	216.8	-4.017	0.0005	2.186	0.0005
P2	2043.3	377.3	-6.253	0.0002	1.535	0.0001
P3	2030.2	352.4	-0.797	0.0018	1.444	0.0438
P4	2034.1	536.8	-3.987	0.0008	5.941	0.0005

表3. パラメータの算出値 (選択点)

	焦点距離(f_{3x})		ψ (度)		ϕ (度)	
	平均	分散	平均	分散	平均	分散
P1	2047.5	62.4	-4.018	0.0000	2.319	0.0000
P2	2045.5	126.8	-6.253	0.0002	1.593	0.0000
P3	2036.5	40.3	-0.826	0.0000	1.404	0.0001
P4	2033.3	88.4	-3.994	0.0001	5.999	0.0004
P1	2031.5	126.8	-4.666	0.0001	1.568	0.0000
P2	2028.4	149.2	-6.791	0.0000	0.989	0.0002
P3	2023.9	46.6	-1.541	0.0001	0.827	0.0001
P4	2023.3	157.2	-4.633	0.0000	5.197	0.0001
P1	2036.3	42.8	-3.226	0.0000	2.418	0.0002
P2	2042.7	29.6	-6.014	0.0000	1.229	0.0002
P3	2028.8	22.6	-0.933	0.0000	1.375	0.0001
P4	2028.2	15.6	-3.968	0.0000	5.973	0.0002
P1	2039.0	56.0	-4.015	0.0000	2.188	0.0002
P2	2041.8	174.0	-6.253	0.0001	1.535	0.0000
P3	2025.6	91.7	-0.800	0.0005	1.373	0.0001
P4	2032.5	204.0	-3.981	0.0003	5.941	0.0004

6 あとがき

移動ロボットに搭載されたカメラのキャリブレーションを想定し、ワールド座標系原点などの注目点を画像原点に撮像するためのカメラ回転角及び焦点距離を、観測誤差に対しても安定して求める算法について述べた。さらに、計算した角度によるカメラ回転を物理的に実施した画像における注目点の座標値を測定した。結果は1回の実験で2画素であったのを除き、その他の15回の実験において原点から約1画素程度におさまっており、この算法が有効であることを確認した。今後、本方式を適用して位置・姿勢などのカメラパラメータを測定すること、さらにその結果を用いての物体の自由度復元実験を行う予定である。

謝辞

本研究を実施する機会を与えて頂いた当研究所の中堀一郎部長と光学実験に助言を頂いた中島利郎主任研究員、仲嶋一研究員に感謝します。

参考文献

- [1] T. Echigo, "A camera calibration technique using three sets of parallel lines," Machine Vision and Applications, 3, pp.159-167, 1990.
- [2] 八木, 深田, "三次元物体認識のためのカメラキャリブレーション," 三菱電機研究報告, ORR86-146, pp.1-25, 1986.
- [3] 深田, "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," 情報処理学会研究報告, CV71-4, pp.1-10, 1991.
- [4] T.Shakunaga and H.Kaneko, "Perspective angle transform : principle of shape from angles," Computer Vision, 3, pp.239-254, 1989.
- [5] K.Kanatani, "Transformation of optical flow by camera rotation," IEEE Trans. on PAMI, Vol. 10, No.2, pp.131-143, 1988.