〔解 説〕

ロボットビジョンのモデリング*

伊 藤

稔**

1. はじめに

視覚機能を有する自律的な高性能ロボットの実現に向け、TV カメラ、画像処理技術、高速処理プロセッサ等の開発が積極的に進められている。特に、画像処理技術の分野では、複数視点から得た立体視像を使って3次元計測を行い環境を認識する技術の進展がめざましい¹⁾。この技術により、高度な仕事を自律的にロボットにさせること、あるいは、環境変化に応じて車体を自動誘導する真の“自動車”を実現することなどが可能となる²⁾。

この様なロボットビジョン技術の利用は今後急速に普及するものと期待されるが、その場合、生データの入力源となる TV カメラの位置・姿勢を表わすカメラパラメータが簡易・迅速、かつ、高い精度で校正できることが前提となる。例えば、立体視法では、カメラパラメータの校正値の僅かな誤差が計測値の誤差に大きく反映するため、その校正法が高い分解能と精度を実現する上で極めて重要である³⁾。能動的にスリット光やパターン光を投影して物体表面の3次元分布状態を計測する場合や、視覚によりロボットキャリブレーションを行う場合にも、カメラパラメータ校正法が重要な問題となる。にもかかわらず、カメラパラメータ校正法についての議論が従来やや少なかったのは些か不思議に感じるところである。そこで、本稿では、ロボットビジョンにおけるカメラパラメータ校正法に重点をおいて解説したい。

2. 視覚によるロボット制御

視覚を利用したロボット制御モデルは種々考えられるが、その例を図1に示す。Wは空間座標系、Bは空間座標系との関係WBが予め明らかな任意の基準座標系である。カメラパラメータ校正用の標本点(基準マーク)の位置座標はこの基準座標系で記述される。Rはロボット座標系であり、空間座標系Wとの関係は全く未知である。Cはロボットアームに取り付けられたカメラ座標系

であり、Hはロボットハンド座標系を表わす。共にロボット座標系との関係RC、RHが予め明らかになっている。以上のことから、位置関係が明らかなベクトル(実際には座標系変換行列で表わされる)は図中の太線で表わされたところだけである。この状態で、今、カメラを使って空間の任意の位置(座標値不明)に置かれた物体点Aにハンド座標系Hを移動し物体点Aを掴むこと、つまり、ベクトルHAを求めることを想定しよう。このためには、CAまたはRAが分ればよいが、カメラ像からそれらを直接求めることはできない。そこで、カメラ用の標本板を基準座標系上の既知な位置に予め設け、そのカメラ像からベクトルBCとBAを求める。ベクトルBCを求めることがカメラパラメータの校正であり、BAを求めることが校正されたカメラを使った3次元計測である。なお、図1の例ではWBは必ずしも既知である必要はなく、基準座標系を全く任意に設定できる。しかし、WBが既知であれば、BCを使って空間座標系におけるロボット本体の位置なども算出でき、利用価値があると思われる。

3. カメラモデリングの意義

空間座標系に静止し、かつ、位置・姿勢が精度良く校正された固定カメラを使えば、空間上の任意の物体点の3次元位置を非接触に計測することができ、以下の応用が可能である。(1)構造物や工業部品等の3次元寸法測定が可能であり、物体モデルの形成、部品の寸法管理等が容易となる。(2)複数物体の3次元位置を計測し

図1 視覚によるロボット制御モデルの例

原稿受付 1989年1月29日

* Robot Vision Medeling

** NTT LSI 研究所

てその物体間の位置関係を算出することができ、ロボットによる工業部品のアセンブリ作業等に有効である。(3) 空間を飛来する物体の位置の変化を計測して、その物体の運動軌跡を追跡することができる。(4) ロボットアームなどに取り付けた特徴点を観察することにより、ロボットキャリブレーションや、ロボットアームの運動軌跡を精度良く追跡することが容易となる。

校正したカメラは必ずしも空間座標系に固定されている必要はない。運動するカメラの各位置におけるパラメータを空間座標系に対して求めることができれば、カメラを直接動かしている運動物体(例えばカメラ台)の空間座標系における位置・姿勢を知ることができ、次の応用が可能である。(1) 空間座標系における位置が既知な特徴点を使って、ロボットアームに取り付けたカメラのパラメータを知ることにより、ロボットアームやハンドの空間座標系における位置・姿勢を換算することができる。(2) 空間座標系に固定された特徴点を使って、搬送車上に搭載されたカメラのパラメータを測定することにより、搬送車の位置・姿勢を算出することができる。

このような応用を実現するには、カメラパラメータの校正に対して次のことが要望される。(1) 自律的であること。即ち、人間の推測、判断を介さずに正しい校正值が得られることが望まれる。(2) 高精度であること。部品検査、組み立て、ロボットキャリブレーション等では高い3次元位置精度が要求されるため、カメラパラメータは極力高精度でなければならない。(3) 迅速性に優れること。カメラの位置・姿勢が時間と共に変化する場合には、その変化を遅れることなく追跡できなくてはならない。(4) 安定性・信頼性・監視性に優れること。校正用の標本点の照明状態やその位置、画像中の雑音、カメラの置かれ方等の変化に柔軟に対応でき、結果が安定かつ信頼できることが望まれる。さらに、校正值の誤差を常に監視できることも重要な要件であろう。

4. カメラパラメータの種類及び基本式

カメラパラメータには、カメラ移動に伴い変化する外部パラメータとカメラ固有の内部パラメータとがある。図2に示すように、外部パラメータには、カメラ光軸方位、即ち、空間座標系の座標軸廻りの回転角 (α, ϕ, β) とレンズ主点位置 (c_1, c_2, c_3) があり、内部パラメータには、光軸長あるいは画面距離などと呼ばれるレンズ撮像面距離 L 、光軸点あるいは画面中心などと呼ばれる光軸と撮像面の交点位置 (i_0, j_0) 、及び、画像メモリ上の座標軸と撮像面上の座標軸とを関係付ける2軸の換算比 η_i, η_j があり、未知パラメータ数は合計11個となる。レンズの歪みを考慮すると内部パラメータはさらに

増える。

カメラ座標系 (x_c, y_c, z_c) と空間座標系 (x, y, z) との関係は、カメラ光軸方位 (α, ϕ, β) から成る 3×3 の回転変換行列 M を用いて、次のように表わされる。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x - c_1 \\ y - c_2 \\ z - c_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 M は、座標系のとり方や回転順序に依存するが、図2に示した右手座標系では例えば次式で表わされる。

$$M \equiv (a_{mn}) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

また、カメラ座標系での物体点の座標 (x_c, y_c, z_c) と、それに対応する結像面上の像の座標 (i, j) との関係は、レンズ結像法則により次のように表わされる。

$$\eta_i i = L x_c / y_c + \eta_i i_0 \quad (3)$$

$$\eta_j j = L z_c / y_c + \eta_j j_0 \quad (4)$$

これらの関係から、空間座標系における物体点の位置 (x, y, z) とその像点 (i, j) の関係を表わす次の方程式が得られる。

$$i = \frac{L}{\eta_i} \cdot \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z - a_{11}c_1 - a_{12}c_2 - a_{13}c_3}{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z - a_{21}c_1 - a_{22}c_2 - a_{23}c_3} + i_0 \quad (5)$$

$$j = \frac{L}{\eta_j} \cdot \frac{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z - a_{31}c_1 - a_{32}c_2 - a_{33}c_3}{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z - a_{21}c_1 - a_{22}c_2 - a_{23}c_3} + j_0 \quad (6)$$

この様な関係式は、次のような 4×4 の行列を使っても導くことができる。(1)および(3)(4)はそれぞれ次のように表現される⁴⁾。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & -c_1 \\ -c_2 & \\ -c_3 & \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ y \\ x \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

図2 座 標 系

$$\begin{pmatrix} X \\ Z \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L/\eta_i & i_0 & 0 & 0 \\ 0 & j_0 & L/\eta_j & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

但し、 $i = X/t$, $j = Z/t$ であり、また、 I は 3×3 の単位行列を表わす。(7)を(8)に代入して変形すれば(5)(6)と同じ関係式が得られる。そのほか、ベクトル演算を使っても同じ基本式を導くことができる⁵⁾。

回転変換行列要素 a_{mn} は、 α, ϕ, β の3変数だけから成る非独立の3角関数であり、その行列は直交する。このため、 a_{mn} は直交性保存を表わす次式を満足しなければならない。

$$\sum_{k=1}^3 a_{mk}^2 = 1 \quad (m=1 \sim 3) \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^3 a_{mk} a_{nk} = 0 \quad (m, n=1 \sim 3, m \neq n) \quad (10)$$

従って、カメラパラメータ校正法の課題は、(5)(6)(9)(10)の連立方程式を満足するカメラパラメータをいかに早く、かつ、高い精度で求めるかということである。この計算手法として、従来種々提案されてきた。その代表例は、繰り返し演算により収束解を得ようとする逐次近似解法と、行列演算により直接的に解を得ようとする解析的手法である。

5. 逐次近似解法

従来から最も良く使用されてきた解法は逐次近似解法であり、写真測量の分野を中心に古くから取り扱われてきた⁶⁻¹¹⁾。内部および外部パラメータに近似値を設定すると(5)(6)の各係数が計算できるので、この各係数の近似値を用いて、予め位置が知られた標本点(x, y, z)に対する画像点(i, j)をこれらの方程式から算出し、それと実際の観測画像点との差(誤差関数)を計算する。さらに、内部および外部パラメータ値を逐次変化させ、誤差関数が0になるまで同様な計算を繰り返す。

5.1 具体的計算手順

実際の計算では、方程式の解の任意性のため、未知数を1度に収束させず、次のような3ステップに分けて収束値を得る。

(1) 第1ステップでは、内部パラメータを公称値に固定し、外部パラメータの近似値を計算する。先ず、外部パラメータの初期値を求めるため、標本点が全てある平面上に存在すると仮定する。この仮定により、物体上の座標(x, z)と画像点(i, j)は、射影幾何学の原理により次式で書くことができる。

$$i = \frac{b_1 x + b_2 z + b_3}{b_7 x + b_8 z + 1} \quad (11)$$

$$j = \frac{b_4 x + b_5 z + b_6}{b_7 x + b_8 z + 1} \quad (12)$$

未定係数 $b_1 \sim b_8$ は、4点以上の標本点の画像から最小自乗法により計算される。ところで、上式は、(5)(6)と良く類似した形を有する。そこで、(5)(6)において z に標本点の z 値の平均値を代入して係数比較を行えば、外部パラメータ $c_1, c_2, c_3, \alpha, \phi, \beta$ の初期値 $c_1', c_2', c_3', \alpha', \phi', \beta'$ を求めることができる。次に、この初期値を使って外部パラメータを補正する。そのために、先ず、(5)(6)を次のように変形する。

$$F = \frac{L}{\eta_i} \cdot \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z - a_{11}c_1 - a_{12}c_2 - a_{13}c_3}{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z - a_{21}c_1 - a_{22}c_2 - a_{23}c_3} + i_0 - i \quad (13)$$

$$G = \frac{L}{\eta_j} \cdot \frac{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z - a_{31}c_1 - a_{32}c_2 - a_{33}c_3}{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z - a_{21}c_1 - a_{22}c_2 - a_{23}c_3} + j_0 - j \quad (14)$$

外部パラメータの初期値の周りでテーラー展開し、2次以上の項を無視すると、(13)は次のように表現できる。

$$F = F'(c_1', c_2', c_3', \alpha', \phi', \beta') - \Delta F_1 \quad (15)$$

$$\Delta F_1 = \frac{\partial F}{\partial c_1} \Delta c_1 + \frac{\partial F}{\partial c_2} \Delta c_2 + \frac{\partial F}{\partial c_3} \Delta c_3 + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial F}{\partial \phi} \Delta \phi + \frac{\partial F}{\partial \beta} \Delta \beta \quad (16)$$

G についても同様である。 F', G' 及び各係数に外部パラメータの初期値および内部パラメータの公称値を代入し、さらに、複数(n 個)の標本点座標とその観測画像点座標を入れると、 $\Delta c_1, \Delta c_2, \Delta c_3, \Delta \alpha, \Delta \phi, \Delta \beta$ を未知変数とする次の行列方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial c_1} & \frac{\partial F}{\partial c_2} & \frac{\partial F}{\partial c_3} & \frac{\partial F}{\partial \alpha} & \frac{\partial F}{\partial \phi} & \frac{\partial F}{\partial \beta} \\ \frac{\partial G}{\partial c_1} & \frac{\partial G}{\partial c_2} & \frac{\partial G}{\partial c_3} & \frac{\partial G}{\partial \alpha} & \frac{\partial G}{\partial \phi} & \frac{\partial G}{\partial \beta} \end{pmatrix}_m \times (\Delta c_1, \Delta c_2, \Delta c_3, \Delta \alpha, \Delta \phi, \Delta \beta)^T = (F'_m, G'_m)^T, \quad m=1 \sim n \quad (17)$$

この方程式から最小自乗法を使って6個の未知変数を算出し、 $c_1, c_2, c_3, \alpha, \phi, \beta$ の初期値を補正する。次に、この補正値を初期値として上述の手順により補正値を再度計算する。これらの操作を繰り返して外部パラメータの近似解の収束値を求める。

(2) 第2ステップでは、外部パラメータのみならず内部パラメータの近似解の収束値を同時に算出する。外部パラメータの初期値はステップ1で求めた収束値とし、また、内部パラメータの初期値は公称値とする。これらの初期値の周りでテーラー展開し、2次項以上を無視すれば、(15)の F は ΔF_1 の代りに下記の ΔF_2 で書き直した式となる。

$$\Delta F_2 = \Delta F_1 + \frac{\partial F}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial F}{\partial i_0} \Delta i_0 + \frac{\partial F}{\partial j_0} \Delta j_0 \quad (18)$$

G についても同様である。各係数に初期値を入れ、また、複数個の標本点座標とその観測画像点座標を入れると、

(17) に類似し, $\Delta L, \Delta i_0, \Delta j_0$ を含め計 9 個の未知変数を持つ行列方程式が得られるので, 最小自乗法によりこれら 9 個の未知変数を算出し, $c_1, c_2, c_3, \alpha, \phi, \beta, L, i_0, j_0$ の補正值を得る. 次に, この補正值を初期値として, 上述の手順により再度補正值を計算する. これらの操作を繰り返して内部および外部パラメータの近似解を得る.

(3) 第 3 ステップでは, さらにレンズ歪み係数 k_1, k_2 を同時に考慮した基本式を用いて, 計 11 個の変数の近似解を算出する. 詳細は紙面の都合上割愛したい.

5.2 特長と問題点

このように, 逐次近似解法は未知数が多くなっても, また, 複雑な非線形方程式であっても, 使用できるという特長がある. また, パラメータ α, ϕ, β を陽に取り扱うため, 回転変換行列 M の直交性が自ずと保存されていることも特長の 1 つであろう. しかし, 反面, 連立方程式の解の任意性のため, 初期値や標本点の与え方によっては正しい収束解が得られないこと, および, 一般にかなり長い処理時間を要することがよく指摘される. この点については, 収束性等の考察が必要と思われる.

6. 解析的手法

複数の標本点座標と観測画像点座標との関係は後述するように行列形式で書くことができる. このことに注目して行列演算によりカメラパラメータを直接的に求めることができる. この解析的手法が開発され利用され始めたのは最近のことである.

6.1 基本方程式とその解法

(1) 方法 1^(4,12):

(8) は次のように書き直される.

$$\begin{pmatrix} X \\ Z \\ t \end{pmatrix} = M_b \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

但し, 行列 M_b は (7) を (8) に代入して得られる 3 行 4 列の未知行列である. n 個の標本点を観測すれば,

$$\begin{pmatrix} X_m \\ Z_m \\ t_m \end{pmatrix} = M_b \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{pmatrix}, \quad m=1 \sim n \quad (20)$$

となる. 但し, t_m は各標本点のカメラ光軸座標値 y_c であり, また, $X_m = i_m t_m, Z_m = j_m t_m$ ($m=1 \sim n$) である. この式から最小自乗法を使って未知行列 M_b を計算でき, さらに, M_b の行列要素から内部および外部パラメータの値を算出することができる. なお, t_m の値はある任意の値 t_0 との相対値 (不明な場合は 1) で与えて行列演算を実行しても構わない. この t_0 値は, 行列演算後に, 条件 (9) により確定することができる.

この方法は, 行列方程式が簡単であるため, t_m 又はその相対値が予め分る場合には大変有効と思われる.

(2) 方法 2¹³⁾:

(5) は次式のように書き改めることができる.

$$\begin{aligned} a_{21}ix + a_{22}iy + a_{23}iz + B_1x + B_2y + B_3z \\ - B_1c_1 - B_2c_2 - B_3c_3 = g_2i \end{aligned} \quad (21)$$

但し,

$$g_k = a_{k1}c_1 + a_{k2}c_2 + a_{k3}c_3 \quad (22)$$

$$B_k = -La_{1k}/\eta_i - i_0a_{2k} \quad (23)$$

ここで, 各係数を g_2 で規格化すれば,

$$A_1ix + A_2iy + A_3iz + A_4x + A_5y + A_6z + A_{10} = i \quad (24)$$

の形に書き直すことができる. (6) に対しても同様に次式の関係が得られる.

$$A_1jx + A_2jy + A_3jz + A_7x + A_8y + A_9z + A_{11} = j \quad (25)$$

ここでは (5) (6) から代数的に (24) (25) を導いたが, 4×4 の行列形式を使っても同じ形の式を導出することができる. また, ベクトル演算により求めることも可能である⁹⁾. n 個の標本点座標とその観測画像点座標とを当てはめると,

$$G \begin{pmatrix} ix, iy, iz, x, y, z, 0, 0, 0, 1 \\ jx, jy, jz, 0, 0, 0, x, y, z, 1 \end{pmatrix}_m = (i_m, j_m) \quad (26)$$

$$m=1 \sim n$$

の形の行列方程式が得られる. ここで,

$$G \equiv (A_1, \dots, A_{11}) \quad (27)$$

である. (26) から, 最小自乗法により未知行列 G を算出することができる. 次に, G の各行列要素の値から回転変換行列 M および内部パラメータを求める. 先ず, a_{21}, a_{22}, a_{23} は, 行列 M の直交条件 (9) を使って A_1, A_2, A_3 から計算される. $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{31}, a_{32}$ および, a_{33} は, (9) を使って, (22) から算出される. 内部パラメータは, 行列 M の直交条件 (10) を利用して, (22) から算出することができる.

こうして算出されたカメラパラメータは, $\sum_{k=1}^3 a_{1k}a_{3k} = 0$ を除いて, 回転変換行列 M の直交条件 (9) (10) を完全に満足する. $\sum_{k=1}^3 a_{1k}a_{3k}$ の算出値についても, 方法 2 においては実際にはほぼ 0 の値を持っている. このため, 行列 M の直交条件はほぼ完全に満足されているとして取り扱っても, 実用上問題がないと思われる. 反面, 方法 1 と同様, 内部パラメータを固定して計算できないため, その算出値が標本点条件により変動し易い.

(3) 方法 3¹⁴⁾:

$i_0 = j_0 = 0$ と仮定すれば, (5) (6) から次のような L を含まない関係式が得られる.

$$\frac{i}{j} = s \cdot \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z - g_1}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z - g_3} \quad (28)$$

但し, $s = \eta_j/\eta_i$ である. (28) を展開し, (22) の g_3 で

規格化すれば、

$$a'_{11}sjx + a'_{12}sjy + a'_{13}sjz - jg_1' - a'_{31}ix - a'_{32}iy - a'_{33}iz = i \quad (29)$$

n 個の標本点座標とその観測画像点座標を当てはめれば、次の行列方程式で表現できる。

$$(j_m x_m, j_m y_m, j_m z_m, -j_m, -ix_m, -iy_m, -iz_m) \times (sa'_{11}, sa'_{12}, sa'_{13}, g_1', a'_{31}, a'_{32}, a'_{33})^T = i_m, \quad m=1 \sim n \quad (30)$$

従って、未知行列の各要素を算出できる。次に、この行列要素から回転変換行列の直交条件 (9) を使って、 $g_3, a_{31}, a_{32}, a_{33}$ 、さらに、 $s, a_{11}, a_{12}, a_{13}$ を算出する。また、 a_{21}, a_{22}, a_{23} は $a_{2k}^2 = 1 - a_{1k}^2 - a_{3k}^2$ (但し、 $k=1 \sim 3$) の関係から計算される。次に、 L を求めるため、(6) から n 個の標本点座標とその観測画像点座標を当てはめ、行列方程式で表わせば、

$$(W_{3m} - g_3, j_m)(L, g_2)^T = j_m W_{2m} \quad (31)$$

$$W_{km} = a_{k1}x_m + a_{k2}y_m + a_{k3}z_m, \quad m=1 \sim n \quad (32)$$

この式から L および g_2 を算出することができる。

この方法は、未知行列要素数が 7 個と少ないこと、 L に依存せずに行列 M の要素を算出できることの特長がある。しかし、回転変換行列の直交条件 (10) が行列演算以後に制約条件として使われないため、得られた行列要素 a_{mn} が行列の直交条件を満足するとは限らない。

(4) 方法 4¹⁵⁾:

方法 3 と同様、 $i_0 = j_0 = 0$ とする。また、カメラ像が光軸点を通る直線 P を空間座標系に用意する。直線 P とその画像 Q はそれぞれ次の形で表現できる。

$$p_1x + p_2y + p_3z + p_4 = 0 \quad (33)$$

$$i = q \cdot j \quad (34)$$

(34) により (28) は次のように書き改められる。

$$(sa_{11} - a_{31}q)x + (sa_{12} - a_{32}q)y + (sa_{13} - a_{33}q)z - (g_1 - g_3q) = 0 \quad (35)$$

(33) と (35) の係数比較を行えば

$$sa_{1k} - a_{3k}q = p_k, \quad k=1 \sim 3 \quad (36)$$

$$-g_1 + g_3q = p_4 \quad (37)$$

であるから、(9) (10) を利用して変形すれば、未定係数 h を含む次の関係式が得られる。

$$(ha_{31}, ha_{32}, ha_{33})(p_1, p_2, p_3)^T = -q \quad (38)$$

$$(ha_{11}, ha_{12}, ha_{13})(p_1, p_2, p_3)^T = s \quad (39)$$

3 本以上の非平行な直線を用いれば、(38) から行列方程式が得られるので、最小自乗法により、 $ha_{31}, ha_{32}, ha_{33}$ を算出することができる。さらに、直交条件 (9) により h が確定する。その結果を使って、(39) から $s, a_{11}, a_{12}, a_{13}$ を算出できる。この後の手続きは方法 3 とほぼ同じである。

この様な方法は、方法 3 の特長のほか、直線マークを

標本点の代りに使える利点がある。しかし、光軸点を通る 3 本以上の非平行な直線を用意する処理が厄介である。また、方法 3 と同様、計算結果が直交条件 (10) を満足するとは限らない。

6.2 問題点と対策

解析的手法は、逐次近似解法に見られる多数回の繰り返し演算が不要なため、処理時間が大幅に短縮できる利点がある。しかし、反面、内部パラメータを光学的方法等による正確な校正値に固定したままで回転行列の直交条件をほぼ完全に満足する外部パラメータを算出することができないため、主に校正条件に依存した、解の任意性に起因すると思われる大きな誤差が入る可能性がある。実際、標本点の計算上の投影点と実際の投影点とのずれがほとんど見られないにもかかわらず、カメラパラメータの算出値が現実の値から明らかに外れている場面に遭遇することがある。このことは、カメラ位置の計測を介したロボット制御あるいは搬送車の制御において重要な図 1 のベクトル $\overline{BC}$ の測定精度の信頼性が不十分であることを意味する。このような問題が残されているため、解析的手法を用いる際には、回転変換行列の直交性、内部パラメータ値の変化等に留意して、結果を常時監視した方が無難であると思われる。なお、このような問題の対策として、次の方法が提案されている。

方法 5¹⁶⁾:

光軸長および光軸点の算出誤差を表わす誤差パラメータ (第 5 章の誤差関数ではない) を (3) (4) に導入し、方法 2 と同様の手順でカメラパラメータを求める。その際、誤差パラメータも同時に算出する。次に、誤差パラメータが 0 となるようにカメラパラメータ値の 1 部を補正し、未知数を減じて再度最小自乗法による行列演算を実行する。通常この 2 回の行列演算により、予め正確に校正済みの内部パラメータになんらの変更を加えることなく、回転変換行列 M の直交性がほぼ完全に保存された解を、簡易・高精度に算出することができる。

6.3 校正精度

校正精度の検討例が今までに 2 件報告されているので、以下に紹介したい。相対誤差は、誤差をカメラ-物体間距離で規格化した値とする。

(1) 60 点の標本点を持つ標本板 1 枚を使い、方法 3 に基づいてカメラパラメータを算出し、次にそれを使って標本点をカメラ画像から空間座標系にバックトレースし、実際の標本点座標とのずれを調べた¹⁴⁾。横方向の誤差は距離 4 インチに対し平均 0.7 ミル、最大 1.3 ミル、相対誤差はそれぞれ 1.8×10^{-4} 、 3.3×10^{-4} である。奥行き方向については不明である。また、8 枚の標本板、計 480 個の標本点を使って 2 台のカメラパラメータを求

めた後、それを使って標本点の3次元位置を算出し、実際の位置とのずれを求めた結果によれば、奥行き方向の誤差は、距離4インチに対し平均0.6ミル、最大1.8ミル、相対誤差はそれぞれ 1.5×10^{-4} 、 4.5×10^{-4} であった。計算時間は59秒、全処理時間は不明である。なお、標本点は格子のコーナとし、その観測画像点はサブピクセル処理およびエッジの直線外挿法により検出している。

(2) 25点の小円形標本点を持つ標本板の画像1枚のみから方法5の処理に基づきカメラパラメータを算出した¹⁶⁾。校正精度を調べるため、カメラまたは標本板の位置を0.1mmずつ移動しながら、また、0.00628ラジアンずつ回転しながら、カメラパラメータ算出値の変化を追跡した。距離約1mに対して、奥行き方向の位置誤差は平均0.05mm、最大0.1mm以内であり、相対誤差はそれぞれ 5×10^{-5} 、 1×10^{-4} であった。また、角度誤差は平均 1.2×10^{-4} ラジアン、最大 5×10^{-4} ラジアン以内であった。処理は完全自動となっており、標本点識別処理に約2秒、計算時間1秒以内、データ転送・記録・表示時間をも含めた全所要時間は6秒以内であった。校正した結果は3眼立体視に適用され、1m程離れた物体の3次元計測誤差を、画像の量子化に伴う最大誤差1~2mm(サブピクセル処理無し)の範囲以内に押えることに成功している^{13,17,18)}。

7. お わ り に

ロボットビジョンのモデリングにおいては、カメラパラメータをいかに簡易・迅速・高精度に、かつ、信頼性高く求めるかというカメラパラメータ校正法が基本的な課題であるので、本稿では、主に、従来の代表的なカメラパラメータ校正法について、できるだけ表示法を統一して紹介した。逐次近似解法が写真測量の分野で発展し長い間利用され、最近では本稿で紹介した種々の解析的手法が提案され利用され始めており、ロボットビジョンのモデリングの問題は山場を越したように感じられる。しかし、ロボットの制御に利用するには、本稿で指摘したように、回転変換行列の直交性の保存、内部パラメータ値の再現性等に関する議論がまだ充分ではなく、今後も深い考察が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 伊藤：“立体視を用いた三次元計測技術”，電気学会論文誌c, Vol.107-7, pp.613-618, 1987.
- 2) C. Thorpe, M. H. Hebert, T. Kande and S. A. Shafer, “Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol.10-3, pp.362-373, 1988.
- 3) S. D. Blostein and T. S. Huang: “Error Analysis in Stereo Determination of 3-D Point Positions”, IEEE

- Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol.9-6, pp.752-765, 1987.
- 4) M. R. Driels and E. A. Collins: “Assembly of Non-Standard Electrical Components Using Stereoscopic Image Processing Techniques”, Annals of the CIPR, Vol.34-1, pp.1-4, 1985.
- 5) Y. Yakimovsky: “A System for Extracting Three-Dimensional Measurements from A Stereo Pair of TV Cameras”, Comp. Graph. Imag. Proc., Vol.7, pp.195-210, 1978.
- 6) V. I. Abdel-Aziz and H. M. Karara: “Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry”, Proc. of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp.1-19, 1971.
- 7) I. Sobel: “On Calibrating Computer Controlled Cameras for Perceiving 3-D Scenes”, Artif. Intell., Vol.5, pp.185-198, 1974.
- 8) H. M. Karara and V. I. Abdel-Aziz: “Accuracy Aspects of Non-Metric Imageries”, Photogrammetric Engineering, Vol.XL, pp.1107-1117, 1974.
- 9) I. W. Faig: “Calibration of Close-Range Photogrammetric System: Mathematical Formulation”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.41-12, pp.1479-1486, 1975.
- 10) E. A. Parrish and A. K. Goksel: “A Camera Model for Natural Scene Processing”, Pattern Recg., Vol.9, pp.131-136, 1977.
- 11) 石井, 坂根, 柿倉, 三上: “3次元位置・姿勢センサとロボットへの応用”, 信学会研技報, SC-84-9, pp.91-100, 1984.
- 12) S. Ganapathy: “Decomposition of Transformation Matrices for Robot Vision”, IEEE Int. Conf. on Robotics, pp.130-139, 1984.
- 13) M. Ito and A. Ishii: “Range and Shape Measurement Using Three-View Stereo Analysis”, Proc. of Comp. Vis. Patt. Recog., pp.9-14, 1986.
- 14) R. V. Tsai: “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3-D Machine Vision”, Proc. of Comp. Vis. Patt. Recog., pp.364-374, 1986.
- 15) 越後: “3組の平行線群を利用したカメラパラメータの校正” 情処学会研究会, CV-55-3, pp.1-8, 1988.
- 16) 伊藤, 石井: “反復法によらない自動カメラキャリブレーション”, 信学会研技報, PRL 85-16, pp.57-62, 1985.
- 17) M. Ito and A. Ishii: “Three-View Stereo Analysis”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol.8-4, pp.524-532, 1986.
- 18) 伊藤, 石井: “3眼立体視による多面体形状計測”, 信学会研技報, PRL 85-21, pp.19-26, 1985.

伊藤 稔 (Minoru ITO)

昭和42年東京工業大学理学部応用物理学科卒, 44年大学院修士課程原子核工学専攻修了, 同年日本電信電話公社(現, NTT日本電信電話株式会社)入社, 現在LSI研究所プロセス自動化研究部主任研究員, 57年工学博士, この間, 光エレクトロニクス(光磁気記憶, 光ファイバ, 半導体レーザなど)酸, 化物超伝導素子, ロボットビジョン(視覚3次元計測), および, パターン検査技術の研究開発に従事, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 計測自動制御学会各会員。