V35 平行四辺形を利用したカメラキャリブレーション

高橋 章[†]，石井 郁夫[†]，牧野 秀夫[††]，中静 真[††]

† 新潟大学大学院自然科学研究科，†† 新潟大学工学部

1. はじめに

コンピュータビジョンで正確な3次元計測を行うのに不可欠なカメラキャリブレーションについて，既知の大きさと形状を持つ平行四辺形を利用してカメラの内部・外部の線形変換パラメータを計測する方法を提案する．内部パラメータは4自由度最適化で求め，外部パラメータは回転成分と並進成分を分けて代数的に求める．この方法は，Zステージなどの特別な計測機器を必要としない，成分毎に分けて推定するので必要とされる拘束条件が満足される，計算コストが低いといった利点を持つ．

2. 方法

2.1. 設定

本報では，コンピュータ上の画像フレーム座標系 uv と，視点を原点 O_c，光軸を z 軸，画像面を $z=1$ とするピンホールカメラモデルを用いるカメラ座標系 O_c-xyz，平行四辺形の法線を Z 軸として定めるワールド座標系 O_w-XYZ を扱う（図1参照）．

フレーム座標系からカメラ座標系への変換を，

$$(x,y,1)=\left(\frac{u-u_0}{f_u},\frac{v-v_0}{f_v},1\right) \tag{1}$$

と定める．ここで，$[u_0,v_0]$ は画像中心，f_u, f_v は水平，垂直方向の焦点距離である．以下では $x=(u_0,v_0,f_u,f_v)$ をカメラ内部パラメータと呼ぶ．x はシステムに固有であり，カメラ，レンズ，デジタイザの設定を変更しない限り変化しない．

ワールド座標系からカメラ座標系への変換を，

$$(x\ y\ z)^{\mathrm{T}}=R(X\ Y\ Z)^{\mathrm{T}}+T \tag{2}$$

と定める．ここで，R は 3×3 の回転行列，T は 3×1 の並進ベクトルである．以下では R を回転成分，T を並進成分，両者を合わせてカメラ外部パラメータと呼ぶ．R の各列ベクトルはそれぞれ X,Y,Z 軸方向の単位ベクトルのカメラ座標を表し，T は O_w のカメラ座標 (X_0,Y_0,Z_0) を表す．

2.2. 内部パラメータの推定

既知の形状を持つ平行四辺形 $P_1P_2P_3P_4$ の投影像 $p_1p_2p_3p_4$ のフレーム座標値と，内部パラメータの候補 x が与えられた場合を考える．

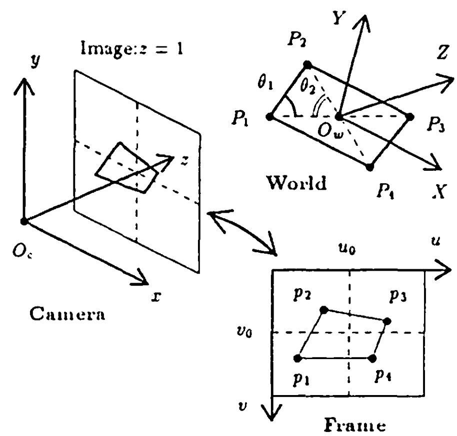

図1 座標系の設定

各点の座標を式(1)よりカメラ座標値に変換する．3点 $O_c,p_i,p_j, i=1,2,3,4, j=4,1,2,3$ が定める平面の法線ベクトルを N_i とすると，辺 P_1P_4, P_1P_2 に平行な単位ベクトル（方向ベクトル）V_1,V_2 は，

$$V_1 /\!/ N_1\times N_3,\quad V_2 /\!/ N_2\times N_4 \tag{3}$$

これは空間中で平行な直線の投影像について消失点を求め，空間中の直線の方向を求めることと等価であるが，この式では投影像が平行で消失点が無限遠になる場合でも例外処理無しに実行できる．

また，3点 $O_c,p_i,p_j, i=1,2, j=3,4$ が定める平面の法線ベクトルを N_5,N_6 と定め，$V_3 /\!/ V_1\times V_2$ とすると，対角線 P_1P_3, P_2,P_4 の方向ベクトル V_5,V_6 は，

$$V_5 /\!/ V_3\times N_5,\quad V_6 /\!/ V_3\times N_6$$

与えられた x が真値であるとき，$V_1\cdot V_2=\cos\theta_1$，$V_5\cdot V_6=\cos\theta_2$ となる．ここで，θ_1 は2辺のなす角（内角），θ_2 は対角線のなす角で既知とする．従って，内角と対角線のなす角のペナルティー関数を

$$E_1(x)=|\cos\theta_1-V_1\cdot V_2|,\ E_2(x)=|\cos\theta_2-V_5\cdot V_6|$$

と定め，$E(x)=E_1E_2$ を最小にする x を求めることでカメラ内部パラメータが推定できる．内部パラメータ推定では平行四辺形の形状（θ_1,θ_2）だけが必要で，大きさは必要とされない．

2.3. 回転成分の推定

最適な内部パラメータが得られたときの $V_1, V_3 \times V_1, V_3$ がそれぞれ X, Y, Z 軸方向の単位ベクトルのカメラ座標を表す．従ってこれらのベクトルを列ベクトルとする行列 R を定める．内部パラメータが既知の場合には式 (3) より V_1, V_2を求め，$V_3 /\!/ V_1 \times V_2$ とする．

回転行列は次の性質を満たす必要がある：1) 各列ベクトルは大きさが 1 で，どの 2 つの列ベクトルも互いに直交する．2) 各行ベクトルは大きさが 1 で，どの 2 つの行ベクトルも互いに直交する．行列 R はこの性質を満たす．外部パラメータの回転成分も内部パラメータと同様に平行四辺形の形状だけが必要とされる．

2.4. 並進成分の推定

平行四辺形の対角線の 1/2 長 D が既知であれば，対角線交点 O_w の 3 次元座標を定めることができる．

O_c から p_1 に向かう方向ベクトルを v_1，O_c から対角線交点の投影像 p_0 に向かう方向ベクトルを v_0とする．3 点 O_c, p_0, O_w が共線とすると，$O_w = d_0 v_0$ と表せる．ここで d_0 は $O_c O_w$ 間の距離（奥行き値）である．すると，頂点 P_1 は，$P_1 = d_0 v_0 - D V_5$ と表せる．P_1 と直線 $O_c p_1$ との距離が最小となる d_0 を求める．

$$d_0 = \frac{(v_0 \cdot v_1)(v_1 \cdot (-V_5)) - (v_1 \cdot (-V_5))}{1 - (v_0 \cdot v_1)^2} D \qquad (4)$$

他の頂点についても同様にして奥行き値を求め，平均値を真の $O_c O_w$ 間の距離として O_w のカメラ座標値を求めると並進ベクトル T が定まる．

3. シミュレーション

以下の条件でシミュレーションを行った；画像フレームと縦横比が等しい長方形を計測対象とする．内部パラメータの真値を $x = (320, 200, 564, -528)$ とする．これは 640×400 の画像フレームの中心を画像中心とし，1/3″CCD カメラに 3.6mm レンズを装着した場合に相当する．投影像が画像中心付近にあり，辺の長さが 100 画素程度となるように，長方形の姿勢と O_w の位置をランダムに M 通り定める．投影像頂点に正規分布 $N(0, 0.1^2)$ に従う誤差を加える．内部パラメータの推定では E_1 を目的関数とする方法 a，$E_1 E_2$ を目的関数とする方法 b の 2 つで 4 自由度の Simplex 法による最適化を行い，結果を比較する．

$M = 1, \ldots, 16$ について，10^4 回試行を行い，内部パラメータの真値と収束値の差の標準偏差を求めた．u_0, f_u の結果を図 2 (a)，(b) に示す．v_0, f_v の結果は u_0, f_u とほぼ同様であった．図より，内角だけを目的関数とする方法 a よりも対角線のなす角も利用する方法 b の方が精度が良いこと，投影像の数 M が多いほど精度が良いことがわかる．1 回の試行に要する時間は 0.1 秒程度であった（Pentium/133MHz）．

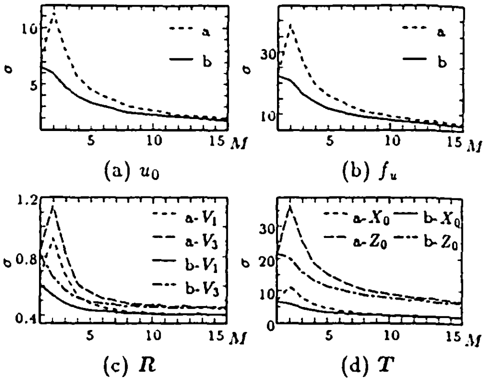

図 2　シミュレーション結果

また，収束時の V_1, V_3について，真値とのなす角の標準偏差を図 2 (c) に，X_0, Z_0 の真値との差の標準偏差を図 2 (d) に示す．V_2, Y_0 の結果は V_1, X_0 とほぼ同様であった．誤差の傾向は内部パラメータの誤差と一致している．回転成分については，平行四辺形の法線方向より平面内のベクトルの方が計測精度が良い．並進成分については，奥行き方向の計測精度より画像面に平行な成分の計測精度が良い．

頂点の誤差が $N(0, 0.2^2)$ に従う場合には各成分の誤差はほぼ 2 倍となることを確認した．

4. まとめ

平行四辺形の投影像からカメラキャリブレーションを行う方法を提案した．内部パラメータは最適化によって推定し，外部パラメータは回転成分と並進成分に分けて代数的に算出する．計算式は簡単であり，ベクトル正規化を除けば加減算と乗算だけで実現できる．内部パラメータと回転成分は平行四辺形の形状を定める内角と対角線のなす角だけで得られる．外部パラメータは平行四辺形の対角線の 1/2 長から得られる．この方法では画像歪みを考慮していないが，歪みの大きい場合でもその影響が無視できる画像中心部の投影像を利用することで実現可能である．

長方形を計測対象としたシミュレーションにより，長方形数が多くなるほど内部パラメータの推定精度が向上し，それに従って外部パラメータの精度も向上することが確認できた．

現在，実際の計測系への適用と画像歪みの補正について検討を進めている．