

## Method of Conveniently Calibrating Camera Parameters

○鈴木 孝宣 (新潟大) 学 松村 浩道 (新潟大)  
正 大矢 誠 (新潟大)

Takayoshi SUZUKI, Niigata University, Ikarashi 2-8050, Niigata  
Hiromichi MATSUMURA, Niigata University  
Makoto OYA, Niigata University

Key Words: Measurement, Accuracy, Camera Parameter, Camera Calibration,  
Three-dimensional Measurement, Stereoscopic Image

### 1. 緒言

ステレオ画像を用いて立体形状を測定しようとする場合には、左右2台のカメラパラメータが既知でなければならない。また、その精度は測定結果に直接影響をおよぼす。パラメータ校正の方法については多くの研究が行なわれているが<sup>(1)</sup>、原理的には絶対空間内で位置が既知である点を撮影し、カメラの位置・姿勢を求めることによって校正を行なう。あるいは、点の位置は未知ながらも、多面体の頂点の対応を利用して姿勢のパラメータを求めるセルフキャリブレーション法<sup>(2)</sup>なども検討されている。

本研究は2台のカメラの位置・姿勢を簡便に校正することを目的とし、3個の球を一直線上に並べて固定したゲージを用いる校正方法について検討を行なった。また、ゲージ(ボールゲージ)を試作して実際に校正を行ない、提案する手法の妥当性について検討し、校正精度についても調べてみた。

### 2. カメラパラメータの校正

2.1 カメラパラメータ 図1に示すように、測定空間内に絶対座標系  $\Sigma_w(O, XYZ)$  とカメラ座標系  $\Sigma_c(O_c, X_c Y_c Z_c)$  および2次元の画像座標系  $\Sigma_l(O_l, UV)$  を設ける。空間上の点Pの  $\Sigma_w$ 座標系での座標  $X(X, Y, Z)$  と  $\Sigma_c$ 座標系での座標  $X_c(X_c, Y_c, Z_c)$  には次のような関係がある。

$$X_c = C(X - O_c) \quad (1)$$

ここに、行列Cを表すロール、ピッチ、ヨー(R, P, Y)とカメラ中心の位置ベクトル  $O_c(O_x, O_y, O_z)$  の計6成分を合わせて外部パラメータ(R, P, Y,  $O_x, O_y, O_z$ )と呼び、これを校正することを考える。

$\Sigma_l$ 座標系上の点  $P_l$  の位置(U, V)を画素を単位として測定し、透視変換の関係を用いると次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} U - U_0 &= U_d(X_c/Z_c) \\ V - V_0 &= V_d(Y_c/Z_c) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $U_d = f/U_D$ 、 $V_d = f/V_D$  ( $U_d, V_d$ )と( $U_0, V_0$ )は、ともにカメラ固有のパラメータであり、これらを内部パラメータと呼ぶ。

2.2 校正方法 校正基準点として絶対座標系での位置ベクトルXが既知の点Pをとると、その点のカメラ座標系での位置ベクトル  $X_c$  は外部パラメータを用いて式(1)によって表現できる。その基準点をカメラで撮影して画像上の位置(U, V)を測定すれば、式(2)はカメラパラメータを未知数とする観測方程式となる。校正基準点を5点以上配置して観測方程式を作り、これを解くことによってパラメータを求めることができる。

2.3 ボールゲージによるパラメータの校正 図1に示したような、一直線上に3個の球を配置したゲージを用いて1台のカメラの外部パラメータを校正することを考える。

内部パラメータは既知であるものとし、カメラ座標系と絶対座標系は平行であるものとする。このとき、式(1)の行列Cは単位行列となるので、1台のカメラのパラメータ校正では原点の移動量  $O_c$  だけを求めることになる。

ゲージを任意の位置に固定し、球  $P_0$  の中心位置を絶対座標系の原点とし、ゲージの方向を2つの角度  $\alpha, \beta$  (未知)によって表現する。このゲージをカメラで撮影し、各球の中心位置を測定すれば、計6本の観測方程式が得られる。これより、未知数であるカメラパラメータ  $O_c$  および  $\Sigma_w$ 系でのゲージの方向  $\alpha, \beta$  を知ることができる。また、ゲージの基点  $P_0$  の位置を移動することなくゲージの方向だけを変えてk回の測定を行なうことができれば、未知パラメータは原点位置の3成分と各ゲージの姿勢を表すパラメータ2個ずつの計  $(3+2k)$  となるが、方程式数は  $(4k+2)$  となるので、kを増加させることによって校正精度を高めることができると思われる。

2台のカメラパラメータを同時に校正する場合には、先と同様に1台のカメラ座標系を絶対座標系と平行であると考えることにする、校正するパラメータは  $O_{c1}, O_{c2}, C_2$  の計9成分となる。これにゲージの方向を表す2つの角度パラメータを加え、合計11個の未知パラメータを12本の観測方程式から求めることになる。また、ゲージ基点の位置を固定し、姿勢だけを変化させた複数回の測定からパラメータ校正を行なうことも可能である。

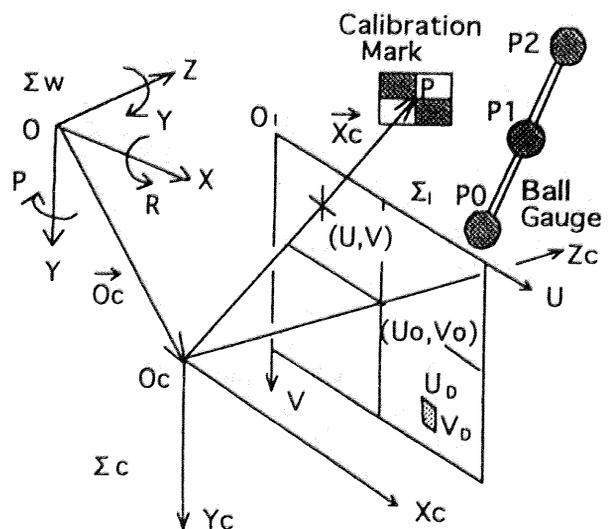


Fig.1 Coordinate System, Calibration Mark, and Ball Gauge

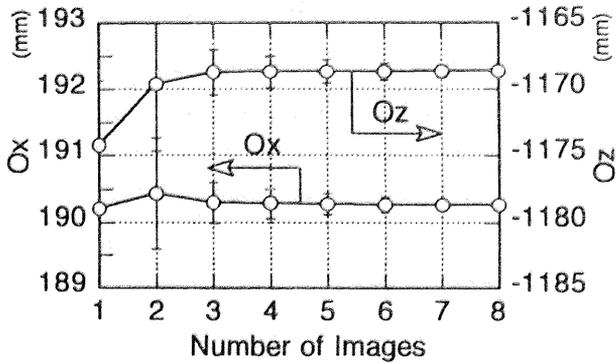


Fig.2 Measuring Accuracy of Ox and Oz

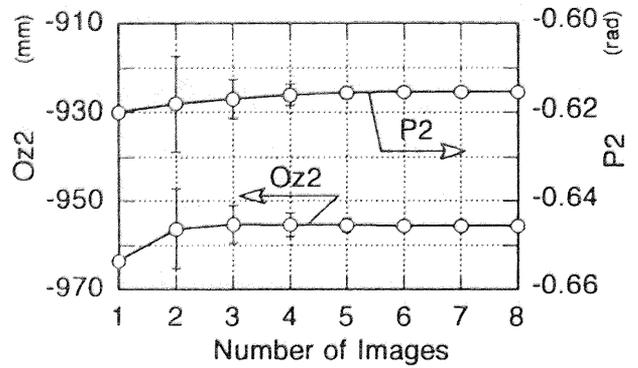


Fig.3 Measuring Accuracy of Oz2 and P2

### 3. 校正実験

3.1 実験装置と測定方法 実験に用いたボールゲージは全長は480mm(PoP1の距離)、ボールの直径は38mmである。ゲージの基点は3個の球を近接させて固定した台座に載せてあり、これによってゲージの姿勢を変更しても基点の位置は変化しないようになっている。

測定実験では1または2台のCCDカメラ(ソニーCCD-V700、ソニーCCD-V800)を空間内に固定しておき、ゲージの姿勢を変えて画像を取得した。その信号を画像入出力ボード(マイクロテクニカMT-98-CVFM)を通して512×512画素(各点につき8bit)のデジタル画像に変換し、パーソナルコンピュータで処理を行なった。画像上での球の中心位置の算出は、ソーベルフィルタ処理を行なって球の輪郭を抽出し、抽出された画素に円をあてはめることを行なっている。

3.2 球の中心位置の精度 パラメータ校正を精度良く行なうためには画像上での校正基準点の位置を正しく算出する必要がある。基準点として球の中心を用いた場合の精度を、平面に描いた市松模様のマークの交点(図1参照)を基準点とする校正方法と比較してみた。校正用マークを3次元測定機に取り付けて約400×300×300mmの測定範囲内で27箇所へ移動し、これを撮影してパラメータを求め、次にこのマークの代わりにゲージに用いた球を取り付けて同様の測定を行なった。両者の結果を比較すると測定値の標準偏差はそれぞれ0.08、0.1(画素)であった。また、R、P、Yの差はそれぞれ10、4、1(分)程度であった。この結果から、球の中心を校正基準点とした場合にばらつきはやや大きくなるが、特に問題になるほどではないと判断できる。

3.3 校正実験 校正用のカメラを1台として、ゲージの位置を8通りに変えて撮影して校正結果を求め、パラメータのばらつきを調べてみた。パラメータの算出は各画像を単独に用いた場合、および、2枚以上の画像を組み合わせた場合についてそれぞれ計算を行なった。図2は横軸に計算に用いた画像の数(k)を取り、パラメータOx、Ozの平均値とばらつき(標準偏差)を示したものである。3種類以上の画像を用いれば平均値はほぼ一定となり、ばらつきも徐々に減少する。1枚の画像により求めた8通りのパラメータの標準偏差はOx、Oy、Ozについてそれぞれ2、2、12(mm)であるのに対して、3枚の画像を組み合わせて求めた場合には(8Cs=56通り)、0.4、0.3、2.1(mm)程度になる。したがって、適切な位置に配置した3種類程度のゲージの画像からパラメータを求めるのが精度的に有利であると考えられる。

次に、カメラを2台配置してゲージの位置を8通りに変えて撮影し、2台のカメラのパラメータ(Ox1、Oy1、Oz1、Ox2、Oy2、Oz2、R2、P2、Y2)を同時に求めた。その際、前述の校正用マークを用いた校正も行ない、両者の結果を比較した。図3は図2と同様に校正に用いた画像の枚数を横軸に取り、画像

Tbl.1 Results of Camera Parameter by Two Method

	Ball Gauge	Calibration Mark	Difference
Ox (mm)	775.68	773.97	1.71
Oy (mm)	-0.23	-0.63	0.40
Oz (mm)	212.35	206.34	6.01
R (rad)	0.0087	0.0085	0.0002
P (rad)	-0.6156	-0.6125	-0.0031
Y (rad)	-0.0626	-0.0612	-0.0014

の組み合わせを変えて各パラメータを計算した場合の平均値と標準偏差を示したものである。1枚の画像のみを用いた場合にはばらつきが大きく、特に2台目のカメラ(右側)については顕著である。5種類以上の画像を用いた場合には標準偏差は最大1.7mm(Oz2)、4分(P2)程度となり、校正用マークを用いた場合と同程度の精度が期待できるようである。

表1はボールゲージの姿勢を変えた5種類の画像を用いた校正結果と校正用マークによる結果および両者の差を右側のカメラについて示したものである。ここでは比較のために左側のカメラ座標系を基準座標系としてパラメータを変換して表示してある。両者の差はOz2について6mm程度とやや大きい、その他はほぼばらつきの標準偏差程度である。

### 4. 結論

ステレオカメラのパラメータを簡便に校正することを目的としてボールゲージを用いる方法について検討し、次のような結論を得た。

- (1)3個の球を一直線上に配置したボールゲージにより2台のカメラパラメータを同時に校正することが可能である。
- (2)基点が同一点まわりで自由に回転できる台座を用いてゲージの姿勢を変えて撮影した画像を複数枚用いることによって校正精度を高めることができる。
- (3)実測結果より、5種類の画像を用いたときの校正精度(標準偏差)は位置について1mm/1000mm、角度については4分程度であった。

校正精度を高めるためには、ゲージ点(球の中心位置)の検出をより正確に行なう必要がある。また、2台のカメラとゲージの相対位置関係にも依存するので、最適なゲージの位置・姿勢に関する検討も必要であると考えている。

### 文献

- (1)張・他2名,機講論, No.910-31(1991),527
- (2)富田・高橋,情報処理, Vol.31 No.5,(1990),650