

# デジタルカメラの内部標定要素の安定性について

山本 允彦\* 藤原 遊\* 服部 進\*\*

## Stability of Interior Orientation Parameters of a Digital Camera

Masahiko YAMAMOTO\* Yu FUJIWARA\* Susumu HATTORI\*\*

### ABSTRACT

This paper treats experimental results of a stability test for interior orientation parameters of a quality digital camera in terms of an effects of repetitive re-attachment of a lens cone to the mount and an effect of small shocks on the camera. The results show that the parameters are proved kept stable for such physical shocks. But another test shows that the parameters are significantly degraded after time elapse of three months.

キーワード：写真計測，デジタルカメラ，安定性，内部標定要素，自己校正

Keywords: Vision Metrology, Digital Camera, Stability, Interior Orientation Parameters, Self-Calibration

### 1. まえがき

デジタルカメラを使用した3次元工業写真計測では，カメラ内部の幾何学構造を表すパラメータが未知である。ただ少なくとも撮影している間は安定であるとして，求めるターゲットの対象空間座標とともに付加パラメータとしてバンドル調整するのが原則である。しかし対象空間にターゲットの数が少なく計測の網が弱いときは，事前にカメラ校正をおこなって内部標定要素を求めておいて，この値を使用する。著者らが使っているカメラでは，経済的な理由のため，カメラマウントとレンズコーンは固定していない。レンズ交換やカメラへの衝撃で内部標定要素が大きく変わってくる可能性がある。

この論文は計測に用いる高級一眼レフカメラについて，レンズの付け替えやカメラへの衝撃，時間的な変化でどの程度内部標定要素が変わってくるか，すなわち幾何がどの程度安定に保たれるかを調べたものである。校正には自己校正法(self-calibration)を使った。

### 2. カメラのモデル

図1にカメラの幾何学的モデルを示す。主点 $(x_p, y_p)$ はレンズ系の中心(光軸の後ろ側節点)からCCD面に下ろした垂線の足である。垂線の長さを画面距離 $c$ と呼ぶ。光学系の中心を通る光線の入射角 $\tau$ と出射角 $\tau'$ はレンズひずみのため

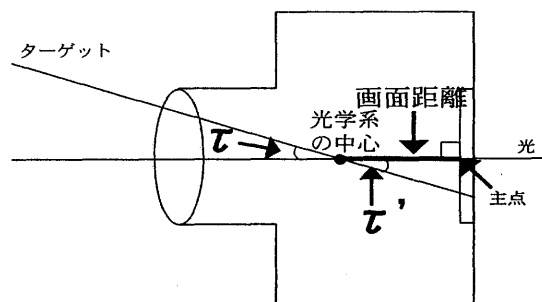


図1 カメラの内部構造  
Fig.1 Camera Geometry

に異なる。レンズひずみモデルとしては伝統的な式(1)の多項式モデルを採用する。これらは、放射方向レンズひずみと接線方向レンズひずみからできている。図2に撮像面(LSIセンサ)の座標系を示した。撮像面上の位置は写真座標系 $XP$ (mm)で表される。

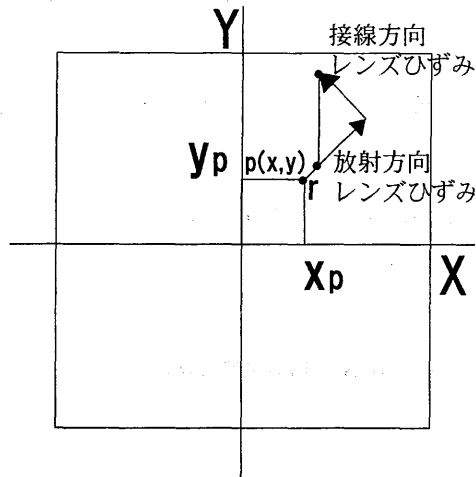


図2 レンズ歪み

Fig.2 Lens Distortions

$$\begin{aligned} \Delta x &= -x_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x - x_p) + P_1 \{r^2 + 2(x - x_p)^2\} \\ &\quad + 2P_2(x - x_p)(y - y_p) \\ \Delta y &= -y_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y - y_p) + 2P_1(x - x_p)(y - y_p) \\ &\quad + P_2 \{r^2 + 2(y - y_p)^2\} \end{aligned} \quad (1)$$

$(x_p, y_p)$  は主点の座標,  $r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$  は任意の点 $(x, y)$ の主点からの距離の2乗である。 $K_1, K_2, K_3$ は放射方向ひずみの係数,  $P_1, P_2$ は接線方向ひずみの係数である。画面距離, 主点座標, レンズひずみの係数の8個のパラメータを内部標定要素と呼ぶ。

### 3. 2段構造のカメラ校正法

校正器具として図3に示すように90\*90cmの板に5mmφの反射ターゲットを1インチ(2.45cm)間隔に貼ったものを用いた。図1の校正板の右に写っているのは、標定用のデバイスである。これを図4のように、板の周り8箇所から、入射角45°程度でカメラを光軸まわりに90°ずつ回転させながら、各位置で2枚ずつ撮影する。そのあとカメラを板に近づけて、撮影画面の1/6に入るようにして鉛直撮影した。各カメラ位置で2枚ずつ撮影して合計28枚を得る。ターゲットが密すぎるので、校正には3インチ間隔に100点のターゲットを使用している。図4に調整計算後に求められた撮影位置を表示した。図の点がカメラの位置、線がターゲットまでの光線を

描いている。図5のようにターゲット像の中心座標を計測し、番号をつける。番号は板の右の列が20~29、次の列に移って30~39、以下同様にして110~119まで番号を振っている。

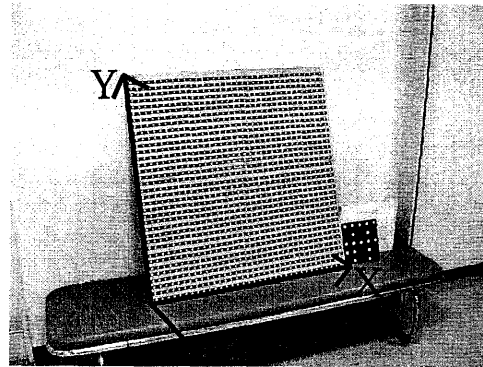


図3 : 校正板

Fig.3 Calibration Board

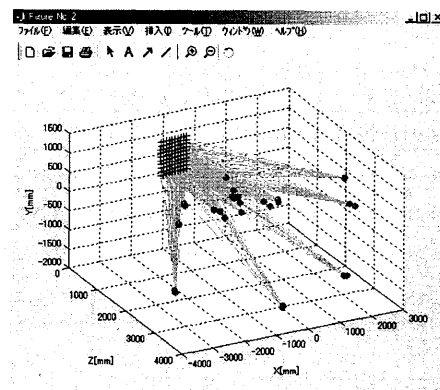


図4 : カメラの撮影形態

Fig.4 Camera Configuration

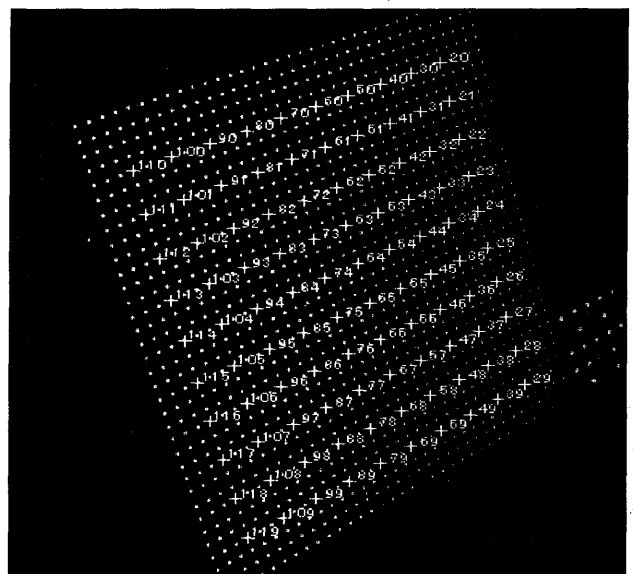


図5 ターゲットの番号付け

Fig.5 Numbering Target images

#### 4. レンズの取替えでのマウントの安定性

校正の実験に使用したカメラはNIKON D2Xであり、その仕様を表1に示す。

レンズをマウントに取り付け、校正して内部標定要素 (IOP1 と呼ぶ) を求めた。つぎにレンズを付け直し、IOP1 の値を使って校正板を計測した。これを2回おこない、精度に劣化が起きるかを調べた。表2はこの一連の計測結果を示す。

表1 実験に使ったカメラの仕様  
Table1 Specifications of the Camera

カメラ	Nikon D2X(CMOS 4,288*2,848 画素)
レンズ	20mm マニュアル単焦点
ストロボ	リングストロボ 強さ 1/8

表2 レンズを付け直して撮影を行った計測精度  
(2005/6/29 日計測) 単位は mm

Table2 Measurement Precision with the Camera with a Lens Cone Re-attached on the Mount

	$\sigma_0$	ターゲット空間座標の内的精度 (mm)			
		X	Y	Z	平均
IOP1	0.000216	0.0059	0.0057	0.0137	0.0092
1 回目	0.000231	0.0064	0.0061	0.0142	0.0096
2 回目	0.000208	0.0060	0.0056	0.0130	0.0089

$\sigma_0$ : ターゲット画像座標の計測値の事後標準偏差(mm)

表2の IOP1 は最初自己校正で求めた値であり、写真座標の誤差の事後推定量が  $0.2 \mu\text{m}$  であり、これは充分よい値である。このときの写真座標の残差を図6に示した。図6の縦軸は残差(mm)で横軸がターゲット像である。ターゲット像は各点 (点番号 20-119) ごとに各写真 (写真番号 1-28) の値を並べた。すなわち表の横軸の値の1~28が写真1~28の点番号20である。赤い線は  $4\sigma$  ( $\sigma$ ; 事前誤差) の値である。特別の偏りは見られない。

表2の1回目, 2回目はレンズをはずしてすぐに付け直し, IOP1 の値を固定して (すなわち内部標定要素既知として), 校正板を計測したときの精度である。同じことを2回おこなっている。これによると, レンズをマウントからははずしたことによる精度の劣化はまったくないようである。このときの残差の図は省略するが, 実質上図6と変わらない結果である。

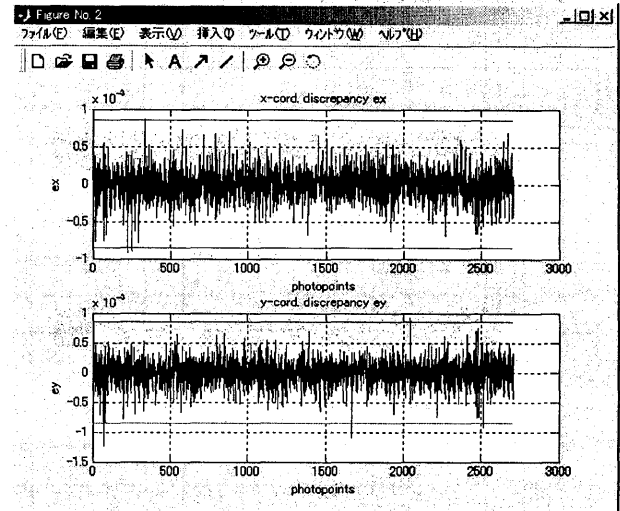


図6: 表2の1回目の計測結果での画像座標残差

Fig. 6 Residuals of Image Coordinates for Table 2, First Reattachment (mm in unit)

#### 5. 衝撃に対するマウントの安定性

カメラに対する衝撃がどの程度精度を劣化させるかを調べた。まず自己校正で内部標定要素 IOP2 を求めた。つぎにレンズをいったんマウントからははずして何度か脱着, 装着を繰り返した。レンズを装着したときに, 机の上でカメラを数度軽く机にぶつけて衝撃を与えた。このあと, 校正板を最初の内部標定要素 IOP2 を使って, 校正板を計測した。この一連の作業を2回繰り返した。表3にこのときの計測精度を示した。実質劣化の兆候は見られない。図7は1回目の計測で得られた画像座標の残差の分布である。

表3 カメラに衝撃を加えてから撮影を行った計測精度  
(2005/7/21 日計測)

Table 3 Measurement Precision with the Camera after repeated physical shocks

	$\sigma_0$	ターゲット空間座標の内的精度 (mm)			
		X	Y	Z	平均
IOP2					
1 回目	0.000222	0.0065	0.0064	0.0150	0.0101
2 回目	0.000213	0.0060	0.0058	0.0141	0.0095

$\sigma_0$ : ターゲット画像座標の計測値の事後標準偏差(mm)

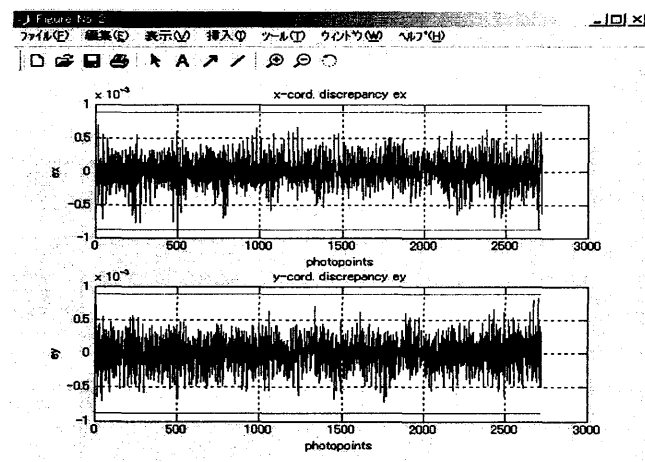


図7 表3, 1回目の計測結果の画像座標残差(単位 mm)  
Fig. 7 Residuals of Image Coordinates for Table 3, First Reattachment and shocks (mm in unit)

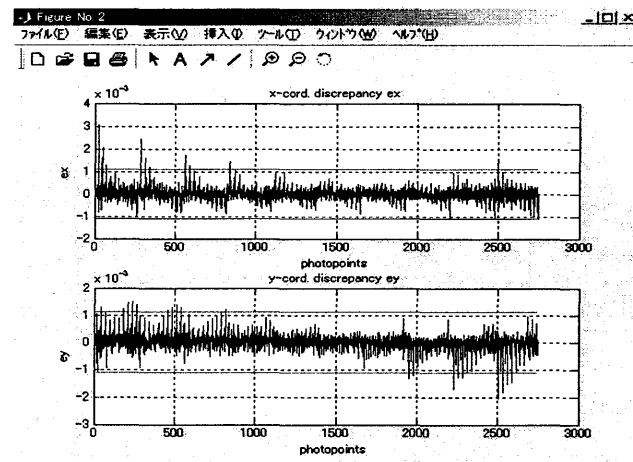


図8 (2005/3/14)の校正値を使った計測の画像座標の残差分布  
Fig.8 Residuals of Image Coordinates for Table 4, (3/14)

## 6. 時間に対する安定性

カメラ自体は計測用に作られていないので、熱変形すると予想される。長期間に渡って内部標定要素が一定に保たれるかどうかを調べた。(2005/7/8)に撮影した写真に対して、(2005/3/14)に行ったカメラ校正の結果 IOP4 と、(2005/6/29)に行った上記のカメラ校正の2回目の結果 IOP03 を使用して精度の劣化を調べた。結果を表4に示す。

表4 時間による計測精度の劣化

Table4 Degradation of Measurement Precision in time elapse

撮影日	$\sigma_0$	ターゲット空間座標の内的精度 (mm)			
		X	Y	Z	平均
3/14	0.000278	0.0081	0.0077	0.0188	0.0127
6/29	0.000208	0.0060	0.0058	0.0141	0.0095
7/8	0.000203	0.0059	0.0057	0.0138	0.0093

$\sigma_0$ : ターゲット画像座標の計測値の事後標準偏差(mm)

表4で、「7/8」は(2005/7/8)撮影で行った自己校正の値である。これによると、3ヶ月経過した内部標定要素は劣化が激しい。3ヶ月間には、物理的なショックはあたえていないものの、何度かレンズコーンの取り外しを行っている。

図8, 図9に(2005/3/14)および(2005/6/29)の校正値で計測した画像座標の残差分布を示した。前者の劣化とくに画面周辺部の劣化が大きいことがわかる。図の縦軸のスケールは図ごとに一定でないので、注意されたい。

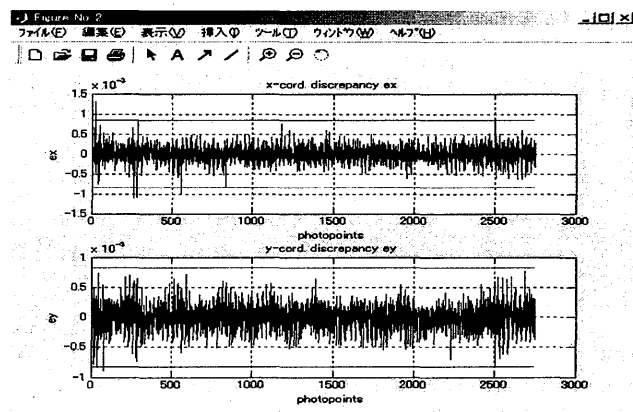


図9 (2005/6/29)の校正値を使った計測の画像座標の残差分布  
Fig.9 Residuals of Image Coordinates for Table 4, (6/29)

## 7. 結論

実験に使用したカメラでは、レンズコーンを固定していないにもかかわらず、レンズの取り外しは予想に反して計測精度に影響を与えなかった。また軽いショックを与えた場合にも影響はなかった。カメラマウントは短期の計測では十分安定である。ただし3ヶ月間もすると標定要素は保たれないことがわかった。

## 参考文献

- [1] 井本 治孝, 服部 進, 秋本圭一, 大西 有三: 2次元ターゲット場によるカメラキャリブレーション, 平成15年度日本写真測量学会年次学術講演論文集, pp.37-40, 2003