近接デジタル写真測量における民生用デジタルカメラの精度評価

Performance Evaluation of Consumer Grade Digital Cameras for Digital Close Range Photogrammetry

高橋 洋二*・近津 博文*

Yoji TAKAHASHI and Hirofumi CHIKATSU

Abstract : Recently, pixel numbers and functions of consumer grade digital cameras are amazingly increasing by modern semiconductor and digital technology, and there are many low-priced consumer grade digital cameras which have more than 10 mega pixels on the market in Japan. For example, 14.7 Mega consumer grade digital cameras have already appeared on the market in 2008.

In these circumstances, convenient digital photogrammetry using consumer grade digital cameras are enormously expected in various application fields. There is a large body of literature and software on the calibration of consumer grade digital cameras. However, there are still problems for efficient digital photogrammetry using consumer grade digital cameras. These problems are performance evaluation of consumer grade digital cameras from the view point of stability, reliability, robustness of housing and physical integrity of the camera, and evaluation of repeated utilization of interior orientation parameters which was obtained beforehand.

With this motive, performance evaluations of consumer grade digital cameras are investigated in this paper with respect to stability, reliability, robustness and issue for repeated utilization of interior orientation parameters using 50 consumer grade digital cameras.

1. はじめに

ここ10年程の間に民生用デジタルカメラの高解像度・多機能化および低価格化が飛躍的な勢いで進み中、市場には多種多様な民生用デジタルカメラが登場し、2008年には1,400万画素を超える CCD センサを搭載した民生用デジタルカメラが発売されている。このような背景から、民生用デジタルカメラによるデジタル写真測量に対する期待は大きく、これまでに民生用デジタルカメラの実用化に関する研究が多数報告されている（例えば、Habib & Morgan, 2003 ; Fraser & Hanley, 2004 ; Laebe & Foerstner, 2004）。筆者らも同様な背景から長年にわたり民生用デジタルカメラのデジタル写真測量への応用を学術的に検証してきた結果、筆者らが現在までに検証を行ってきた民生用デジタルカメラは50機種にも達し、これらの結果から

民生用デジタルカメラをデジタル写真測量に利用する場合には民生用デジタルカメラの焦点距離、主点位置やレンズ歪みなどの内部標定要素の評価が重要であることを示してきた（例えば、近津ら, 2001 ; 近津ら, 2003 ; 高橋・近津, 2008）。

いっぽう、民生用デジタルカメラによるデジタル写真測量の実用化が進む中、予め求めておいた内部標定要素の値を繰り返し使用する光景を度々目にするが、写真測量におけるカメラキャリブレーションとは主点位置、画面距離、レンズ歪みなどの内部標定要素の値を物理的手法により求めているわけではなく、単に数学モデルを満たす値として得られるものであることを考慮すると、予め求めた内部標定要素の値を繰り返し使用することの妥当性について認識しておくことの必要性を感じる。

そこで、本研究では筆者らが検証してきた30～1,470万画素の民生用デジタルカメラ13社50機種のすべてを用いて、民生用デジタルカメラの内部標定要素が計測精度に及ぼす影響について改めて検証を行ない民生用デジタルカメラによるデジタル写真測量の実用性につ

*東京電機大学理工学部 建設環境工学科
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 49, NO. 4, 2010

いて検討を行なうとともに、事前に求めておいた内部で検討を行なうこととする。
 標定要素の値を繰り返し使用することの妥当性について

表 1 民生用デジタルカメラの主な諸元

メーカー	CASIO	CASIO	Kodak	HITACHI	CASIO	CANON	CASIO	CANON	EPSON
機種名	LV-10	LV-20	DC50	i.mega HDG-1	EXILIM EX-S1	PowerShot A10	QV2900-UX	IXY DIGITAL300	CP-900Z
画素数(MPixel)	0.307	0.307	0.38	1.2	1.2	1.25	2	2	3
撮影素子	1/3CMOS	1/3CMOS	CCD	1/2CMOS	1/2.7CCD	1/2.7CCD	1/2.7CCD	1/2.7CCD	1/1.8CCD
解像度	640*480	640*480	756*504	1600*1200	1600*1200	1280*960	1600*1200	1600*1200	2544*1904
センササイズ(mm)*	4.83*3.63	4.83*3.63	6.81*4.54	7.7*6.1	5.37*4.04	5.37*4.04	5.27*3.96	5.27*3.96	7.06*5.29
焦点距離(mm)	6.2	6.0	7.7	8.5	5.6	5.4	6.0	5.4	7.0
撮影高度(mm)	977	1053	866	1024	838	827	1036	866	862

メーカー	CASIO	SONY	ORYMPUS	OLYMPUS	CANON	CANON	Kodak	PENTAX	SANYO
機種名	EXILIMEX-Z3	CyberShot DSC-P7	CAMEDIA C770UZ	μ-30 DIGITAL	IXY DIGITAL55	IXY DIGITAL60	EasyShare V570	Optio Svi	Xacti DSC-S5
画素数(MPixel)	3	3.2	4	4	5	5	5	5	5
撮影素子	1/2.5CCD	1/1.8CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD
解像度	2048*1536	2048*1536	2288*1712	2272*1944	2592*1944	2592*1944	2576*1932	2560*1920	2592*1944
センササイズ(mm)*	5.76*4.29	7.18*5.32	5.75*4.31	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29
焦点距離(mm)	5.8	8.0	6.3	5.8	5.8	5.8	6.4	5.8	6.2
撮影高度(mm)	816	878	916	846	832	806	837	894	852

メーカー	KONICAMINOLTA	CASIO	FUJIFILM	FUJIFILM	CANON	Panasonic	Panasonic	SONY	PENTAX
機種名	DiMAGE X50	EXILIMEX-Z55	FinePix Z1	FinePix Z3	IXY DIGITAL70	LUMIX DMC-FZ7	LUMIX DMC-FX9	CyberShot DSC-T10	Optio W20
画素数(MPixel)	5	5	5.12	5.12	6	6	6	7	7
撮影素子	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD	1/2.5CCD
解像度	2560*1920	2560*1920	2592*1944	2592*1944	2816*2112	2816*2112	2816*2112	3072*2304	3072*2304
センササイズ(mm)*	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29	5.76*4.29
焦点距離(mm)	6.1	5.8	6.1	6.1	5.8	6.0	5.8	6.33	6.3
撮影高度(mm)	863	839	822	820	835	860	845	893	861

メーカー	CANON	CANON	Nikon	OLYMPUS	SONY	FUJIFILM	PENTAX	PENTAX	Nikon
機種名	IXY DIGITAL4	IXY DIGITAL700	COOLPIX500	μ810	CyberShot DSC-N1	FinePix Z100fd	Optio M50	Optio V20	COOLPIX L18
画素数(MPixel)	7.1	7.1	7.1	8	8	8	8	8	8
撮影素子	1/2.5CCD	1/1.8CCD	1/2.5CCD	1/1.8CCD	1/1.8CCD	1/2.5CCD	1/2.35CCD	1/2.35CCD	1/2.5CCD
解像度	3072*2304	3072*2304	3072*2304	3264*2448	3264*2448	3264*2448	3264*2447	3264*2448	3264*2448
センササイズ(mm)*	5.76*4.29	7.18*5.32	5.76*4.29	7.18*5.32	7.18*5.32	5.76*4.29	6.18*4.544	6.18*4.544	5.76*4.29
焦点距離(mm)	6.3	7.7	5.7	7.4	7.9	5.9	6.3	6.3	5.7
撮影高度(mm)	889	857	801	832	866	825	865	839	783

メーカー	FUJIFILM	ORYMPUS	CASIO	CANON	Nikon	Kodak	PENTAX	PENTAX	Panasonic
機種名	FinePix F40fd	μ830	EXILIM EX-Z1000	IXYDIGITAL1000	COOLPIX S600	EasyShare V1003	Optio W60	Optio M60	LUMIX DMC-FX100
画素数(MPixel)	8.3	8.5	10	10	10	10	10	10	12
撮影素子	1/1.6CCD	1/2.35CCD	1/1.8CCD	1/1.8CCD	1/2.33CCD	1/1.8CCD	1/2.3CCD	1/2.3CCD	1/1.72CCD
解像度	3296*2472	3264*2448	3648*2736	3648*2736	3648*2736	3648*2736	3648*2736	3648*2736	4000*3000
センササイズ(mm)*	7.69*5.77	6.009*4.507	7.18*5.32	7.18*5.32	6.18*4.64	7.18*5.32	6.18*4.64	6.129*4.569	7.4*5.55
焦点距離(mm)	8.0	6.4	7.9	7.8	5.0	7.5	5.0	6.3	6.0
撮影高度(mm)	849	844	875	876	677	827	631	799	702

メーカー	CANON	Fujifilm	PENTAX	Nikon	Nikon
機種名	IXY DIGITAL2000IS	FinePix F50fd	OptioA40	COOLPIX S700	COOLPIX S710
画素数(MPixel)	12	12	12	12	14.7
撮影素子	1/1.7CCD	1/1.6CCD	1/1.7CCD	1/1.72CCD	1/1.72CCD
解像度	4000*3000	4000*3000	4000*3000	4000*3000	4352*3264
センササイズ(mm)*	7.6*5.7	7.91*5.94	7.43*5.565	7.39*5.54	7.42*5.56
焦点距離(mm)	7.7	8.0	7.9	7.9	6.0
撮影高度(mm)	876	829	865	851	665

*センササイズは推定値

*センササイズは推定値

2. 民生用デジタルカメラ

民生用デジタルカメラの内部標定要素が計測精度に及ぼす影響および内部標定要素の繰り返し使用の妥当性を検証するにあたり本研究で使用したカメラ50機種の主な諸元を表1に示す。

3. 実験概要

実験は図1に示すテストターゲット（H：480mm，W：640mm，D：20mm）を用いて、画像縮尺がほぼ一定となるように撮影高度を調整し、基線比0.34として各カメラに対してトリプレット撮影を5回ずつ行なうものであるが、各画像は撮影ごとにレンズを焦点距離のテレ端に移動させた後、ワイド端に戻して取得されたものである。また、テストターゲットの中央3列は高さ20mmであり、各円形ターゲットの加工精度は±0.05mmである。精度検証は図中の白丸で印した基準点13点を用いてカメラキャリブレーションをそれぞれ実施し、黒枠で印した検証点86点に対する三次元座標を算出して評価を行なうこととする。なお、これらの点の画素座標は撮影した画像に二値化処理を施した後、面積重心として算出したものである。

いっぽう、トリプレット画像のうち中央画像はレンズ歪み（第3.3項、図3）、主点位置の変動（第4.1項、図5）、キャリブレーションパラメータの変動比（第4.3項、図8）に対して使用するものであり、左右のステレオ画像は精度検証における安定性（第4.1項、図4）、信頼性（第4.2項、図6）、堅牢性（第4.3項、図7）に

図1 テストターゲット

対して使用するものである。また、本研究での結果は5回測定の実平均値である。

3.1 カメラキャリブレーション

本研究でいうカメラキャリブレーションとは、空間後方交会法により外部標定要素 {カメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) 、姿勢 $(\omega, \varphi, \kappa)$ } および内部標定要素 {主点位置 (u_0, v_0) 、焦点距離 (f) 、スケールファクタ (a) 、せん断係数 (b) 、レンズ歪み係数 $(K_1, K_2, K_3, P_1, P_2)$ } を求めることであり、各基準点に対して誘導される下記の共線条件式が観測方程式となる。

$$\begin{cases} x = -f \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \\ y = -f \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 x, y ：画像座標、 X, Y, Z ：基準点の三次元座標、 $m_{11} \sim m_{33}$ ：回転量 ω, φ, κ からなる回転要素

3.2 スケールファクタ

デジタル写真測量において観測される像点の座標は、モニタ上で観測される画素座標 (u, v) であり、センサ上の画像座標 (x, y) を観測することは不可能である。そのため、画素座標はスケールファクタおよびせん断係数を用いた次式により算出される (Faugeras & Toscani, 1987)。

$$\begin{cases} u = u_0 + ax + by \\ v = v_0 + cy \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 u, v ：画素座標、 x, y ：画像座標、 u_0, v_0 ：主点位置に対する画素座標

なお、スケールファクタとは(2)式において画素座標から画像座標への変換係数 a, c であり、本研究ではデジタルカメラの仕様書に記載されているセンサタイプから推定したセンササイズを $l_x \times l_y$ (mm) とするとき(3)式より算出される値をスケールファクタとして採用することとした。

$$a = \frac{1}{p_x} = \frac{N_{cx}}{l_x}, c = \frac{1}{p_y} = \frac{N_{cy}}{l_y} \quad (3)$$

ここに、 N_{cx} ：画面1行に対する画素数、 N_{cy} ：画面1列に対する画素数

3.3 レンズディストーション

レンズディストーションは、デジタル写真測量を行

なう上で最も重要なパラメータの一つである。そのため、これまでに多くのレンズディストーションモデルが提案されているが、本研究では Brown (1971) により提案され、現在広く利用されている放射方向歪み (5式) と接線方向歪み ((6)式) とを考慮した(4)式によりレンズディストーションを検討することとした。なお、放射方向歪みとは図 2-(a)に示すように像がレンズ中心から放射方向に縮むたる型、あるいは伸びる糸巻き型があるが、一般に広角側でたる型の放射方向歪みが表れ、望遠になるにつれて糸巻き型に変化する歪みである。また、接線方向歪みとは図 2-(b)に示すように像がレンズ中心からの放射線状において接線方向にずれた位置に結像する歪みである。

$$x = x' + \frac{x'}{r}(K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7) + P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y' \quad (4)$$

$$y = y' + \frac{y'}{r}(K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7) + P_2(r^2 + 2y'^2) + 2P_1 x' y'$$

$$d(r) = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (5)$$

(a) 放射方向歪み

(b) 接線方向歪み

図2 レンズディストーションイメージ

(a) 放射方向歪み

$$P(r) = (P_1^2 + P_2^2)^{1/2} r^2 \quad (6)$$

ここに、 $r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ 、 x, y ：レンズ歪み補正後の画像座標、 x', y' ：レンズ歪み補正前の画像座標、 K_1, K_2, K_3 ：放射方向歪み係数、 P_1, P_2 ：接線方向歪み係数

図 3 は、各カメラの中央画像に対するカメラキャリブレーションより得られた内部標定要素の値を用いて (5)、(6)式より算出された放射方向歪みおよび接線方向歪みである。図 3 より、放射方向歪みの変動は非線形であること、放射方向歪みの最大値は $2,960\mu\text{m}$ 、最小値は $2\mu\text{m}$ 、接線方向歪みの最大値は $29\mu\text{m}$ 、最小値は $1\mu\text{m}$ であり、民生用デジタルカメラにおいても接線方向歪みに比べて放射方向歪みの影響が非常に大きいことが理解される。いっぽう、画角が大きくなればレンズ歪みも大きくなるものと推測されるが、放射方向歪みにおいて大きな歪み量である $2,960\mu\text{m}$ 、 $890\mu\text{m}$ 、 $654\mu\text{m}$ に対する画角はそれぞれ 71° 、 56° 、 75° であり、また接線方向歪みにおいて $29\mu\text{m}$ 、 $16\mu\text{m}$ に対する画角は共に 61° であり本研究からは画角とレンズ歪みとの関連性は確認されなかった。

4. 精度検証

本研究では各内部標定要素が計測精度に及ぼす影響を安定性、検証点に対する計測精度の良否を信頼性および落下などの衝撃が計測精度に及ぼす影響を堅牢性として民生用デジタルカメラの精度検証を行なうこととする。

(b) 接線方向歪み

図3 レンズ歪み

4.1 安定性

ここでは内部標定要素を表2に示す項目ごとに分けて実施されるカメラキャリブレーションにより、民生用デジタルカメラにおける内部標定要素の安定性について検討を行なう。なお、表2における「固定」とは項目ごとに記した内部標定要素を既知量として扱うことを意味している。例えば、Case1では画面中心の値を既知量とし、Case2ではExifに記載された焦点距離、Case3ではExif情報が記録されるデジタルカメラの場合は正画面素子が採用されることから(2)式において $a=c$ とし、せん断係数 b は0として扱うことを意味している。ただし、Case4以降における「固定」とはレンズディストーション係数を全て0とするものである。すなわち、Case4では放射方向歪み(K_1, K_2, K_3)を考慮しないことであり、Case5以降も同様である。

図4は項目ごとの検討結果を示したものであるが、相対精度とは項目ごとに検証点86点に対して算出される平均二乗誤差の平方和を、内部標定要素を全て未知

量とした際に算出される平均二乗誤差の平方和で除した値($\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} / \sqrt{\sigma_{x_0}^2 + \sigma_{y_0}^2 + \sigma_{z_0}^2}$)である。すなわち、この値が大きいほど精度は低下することを意味しており、計測精度はその内部標定要素の影響を受けるということになる。

さて、筆者らは民生用デジタルカメラをデジタル写真測量に利用する場合には、特に放射方向歪みの評価が重要であることを示してきた(近津ら, 2001; 近津ら, 2003; 高橋・近津, 2008)。このことから当然想定されることであるが、Case4($K_1 \sim K_3$; 固定)において著しい精度低下を示していることから、民生用デジタルカメラにおいては特に放射方向歪みの影響が非常に大きいことが改めて理解される。

以下、Case1(u_0, v_0 ; 固定)でも明らかな精度低下が確認される。また、Case2(f ; 固定)においてもCase1と同様に精度低下が確認されるが、これはExifに記載されている焦点距離と写真測量における画面距離とは異なるものであり、実際には一致しないことに起因するものと推測される。Case3(a, b ; 固定)ではほぼ全ての機種で精度低下は確認されないが、一部の機種では20倍以上の著しい精度低下を示した。この要因としてはこれらの機種には一般的な正画面素子が採用されていなかったことが原因であると判明された。したがって、Case3による精度低下は見られないものと判断される。

表2 キャリブレーションモデル

Case 1	u_0, v_0	固定	Case 6	K_2	固定
Case 2	f	固定	Case 7	K_3	固定
Case 3	a, b	固定	Case 8	P_1, P_2	固定
Case 4	K_1, K_2, K_3	固定	Case 9	P_1	固定
Case 5	K_1	固定	Case10	P_2	固定

図4 安定性の評価

いっぽう、Case 5 (K_1 ; 固定) は放射方向歪み係数のうち K_1 のみを考慮しなかった場合であるが、この場合には Case 4 に次いで精度低下の度合いが大きいことおよび Case 6 (K_2 ; 固定)、Case 7 (K_3 ; 固定) の精度低下は小さいことを考慮すると放射方向歪みの中でも K_1 が精度に与える影響が最も大きいこと、さらに接線方向歪みの係数 P_1, P_2 (Case 8 ~ 10) に関する精度低下は小さいことが確認される。これは、デジタル写真測量やコンピュータビジョンの分野において、放射方向歪みのうち K_2, K_3 が精度に与える影響は K_1 に比べて非常に小さいこと (Brown, 1971; Karara & Abdel-Aziz, 1974; Tsai, 1986; Habib & Morgan, 2003; Laebe & Foerstner, 2004) および高精度デジタル写真測量以外は接線方向歪み P_1, P_2 の影響は無視できること (Fraser, 1997; Doerstel et al., 2003) から、本研究での結果の妥当性が理解される。

ところで、主点位置は放射方向歪みに次いで精度に与える影響が大きいことが理解されたため、ここに改めて主点位置の変動を検討したものが図 5 である。なお、図 5 は画面中心とキャリブレーション後の主点位置との差をそれぞれ画面中心の値で除して正規化したものである。図 5 より機種やメーカーごとに変動は様々であるが、主点位置のズレと精度低下を示した機種との関連性は確認されなかった。したがって、民生用デジタルカメラの安定性を考慮した場合、主点位置 (u_0, v_0)、焦点距離 (f)、スケールファクタ (a)、せん断

図 5 主点位置の変動

係数 (b)、放射方向歪み係数 (K_1) を考慮することが重要であり、特に最近の高解像度化から注目を集めているカメラ付き携帯電話をデジタル写真測量に用いる場合には K_2, K_3 および P_1, P_2 を考慮することにより高精度デジタル写真測量が可能になることも考慮すると (高橋・近津, 2009), 5 次, 7 次の放射方向歪み係数 (K_2, K_3) および接線方向歪み係数 (P_1, P_2) を考慮した 10 個の内部標定要素から構成されるキャリブレーションモデルが機種の影響を受けず安定したキャリブレーションモデルであると判断する。しかるに、本研究の以降の部分においてはこの 10 パラメータキャリブレーションモデルを採用する。

4.2 信頼性

ここでは、計測精度により民生用デジタルカメラの信頼性について検討を行なうものとし、各カメラに対する計測精度を示したものが図 6 である。なお、計測精度とは近接デジタル写真測量において広く利用されている一つの指標であり、平均標準誤差 (σ_c) および計測対象の大きさ (D) から次式より σ_c/D として算出される値である (Fraser, 1996)。

$$\frac{\sigma_c}{D} = \frac{\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)/3}}{\sqrt{DX^2 + DY^2 + DZ^2}} \quad (7)$$

ここに、 σ_c : 平均標準誤差, $\sigma_{x,y,z}$: 検証点 86 点に対する X, Y, Z 座標の平均二乗誤差

D : 対象物の大きさ, DX, DY, DZ : 対象物の X, Y, Z 方向の大きさ

また、図 6 中の曲線は (8) 式において読み取り誤差を 1/10 画素として算出される標準誤差 (Abdel-Aziz, 1982) を (7) 式にあてはめて得られたものである。

$$\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = \frac{H}{f} \sigma_p, \quad \sigma_{z0} = \sqrt{2} \frac{H}{f} \frac{H}{B} \sigma_p \quad (8)$$

ここに、 H : 撮影高度, f : 焦点距離, B : 基線長, σ_p : 読み取り誤差 (1/10 画素)

図 6 より、解像度の増加とともに計測精度が向上しているが、400 万画素以上では計測精度に大きな違いがないことが確認される。また、ほぼ全ての機種で標準誤差と同程度以上の計測精度が得られていることが理解されるが、800 万画素の一部の機種においては標準誤差との間に差が確認される。しかし、ほとんどの機種において 1/20,000 程度の計測精度が得られていることから、読み取りは 1/10 画素以上 (最大で 1/18 画素) の精度で行われていることが確認された。

図6 信頼性の評価

4.3 堅牢性

民生用デジタルカメラの躯体・内部構造の堅牢性の要因には温度変化や経年変化の影響が考えられるが、落下等の衝撃による光軸のズレなどの影響はデジタル写真測量から見てデジタルカメラの堅牢性を考慮する上で重要な要素の一つである。したがって、ここでは民生用デジタルカメラの落下による影響が計測精度と内部標定要素に与える影響について検討を行なうこととする。なお、ここでの実験概要は民生用デジタルカメラ（CANON，10M）を90cmの高さから落下させ、落下後に基線比0.34としてトリプレット撮影を5回ずつ行なうという操作を50回繰り返す。

図7は落下ごとに図1の白丸で印した基準点13点を用いたカメラキャリブレーションを実施した後、算出された検証点に対する相対精度を示したものである。なお、ここでの相対精度とは落下ごとに算出される検証点に対する平均二乗誤差の平方和を落下前に算出された検証点に対する平均二乗誤差の平方和で除した値

図7 落下ごとの相対精度の変動

である。

また、図8に示す変動比とは落下ごとのカメラキャリブレーションにより算出される各内部標定要素を落下前のカメラキャリブレーションにより算出された各内部標定要素でそれぞれ除した値であり、ここでの結果も5回測定の平均値である。

図7より、まず気づくことは落下中における相対精度に大きな違いは見られないことである。しかし、図8より放射方向歪み係数(K_2 , K_3)は落下直後から顕著な変動を示していることが理解される。また、 K_2 , K_3 に比べて変動率は小さいもののせん断係数(b)に関して

図8 落下ごとの内部標定要素の変動

図9 内部標定要素の繰り返し利用による計測精度の関係

も落下直後から変動が確認されるが、これら以外のパラメータに関してほとんど変動が認められない。したがって、内部構造は落下の衝撃により何らかの影響を受けているものと推測されるが、落下による影響はカメラキャリブレーションにおける放射方向歪み係数(K_2, K_3)およびせん断係数(b)で相互に補っているものと判断される。以上の結果からもせん断係数(b)および放射方向歪み係数(K_2, K_3)をも考慮した10パラメータカメラキャリブレーションモデルの妥当性が理解される。

5. 内部標定要素の繰り返し利用

近年民生用デジタルカメラの普及に伴い簡便的写真測量の実施の観点から、事前に求めておいた内部標定要素の値を繰り返し利用する光景を度々目にするが、写真測量におけるカメラキャリブレーションでは数学モデルを満たす値として内部標定要素の各値が求められているにすぎないことを考慮すると、予め求めておいた内部標定要素を繰り返し利用してよいのかという疑問が残る。

そこで、ここでは予め求めておいた内部標定要素を繰り返し利用することの妥当性について検討を行なうこととする。すなわち、トリプレット画像のうちの中央画像に対する10パラメータカメラキャリブレーションにより得られた内部標定要素の値を左右のカメラに共通な既知量として与え、外部標定要素 {カメラの位置・姿勢}のみを未知量としてカメラキャリブレーションを行ない、その結果算出される検証点に対する平均二乗誤差で内部標定要素の繰り返し利用が計測精度に

与える影響を評価しようとするものである。

図9は計測ごとにカメラキャリブレーションを実施して得られた計測精度と、内部標定要素を繰り返し利用して得られた計測精度との関係を示したものである。図9において●が計測ごとにカメラキャリブレーションを実施して得られた計測精度であり、△が内部標定要素を繰り返し利用して得られた計測精度を示しているが、機種ごとにばらつきはあるものの、ほぼ全ての機種において精度低下を示しており、最大で12倍、最小で1.5倍、平均で4倍の精度低下が確認されたが機種と精度低下との関連性は認められなかった。また、この結果はほとんど同時に撮影された中央画像での内部標定要素の値を利用した結果であることを考慮すると、実際のデジタル写真測量において内部標定要素を繰り返し利用した場合には極めて精度の低いデジタル写真測量が行われる危険性があることを十分に認識しておく必要があると判断される。したがって、民生用デジタルカメラによりデジタル写真測量を行なう場合には画像ごとに10個の内部標定要素を考慮したカメラキャリブレーションを実施することが重要であるといえる。

6. まとめ

本研究では30～1,470万画素の民生用デジタルカメラ13社50機種を用いて民生用デジタルカメラの内部標定要素が計測精度に及ぼす影響について改めて検証を行ない民生用デジタルカメラによるデジタル写真測量の実用性について検討を行なった。その主な結果を以下に列挙する。

- ・内部標定要素において精度低下に一番影響を与えるパラメータは放射方向歪みである。
- ・放射方向歪みの中で K_1 の影響が計測精度に及ぼす影響が最も大きく、 K_2, K_3 は K_1 に比べて影響度合いが非常に小さい。
- ・画素構造の違いによるスケールファクタへの影響や、主点位置、焦点距離および接線方向歪みが計測精度に及ぼす影響は無視できない。
- ・解像度の上昇とともに計測精度も上昇し、標準誤差と同程度以上の精度が得られているが400万画素以上では計測精度において大きな変化が見られず、1/20,000程度の計測精度が期待される。
- ・カメラの内部構造は落下の衝撃により明らかな影響を受けているが、落下ごとの相対精度に大きな変化は見られない。
- ・堅牢性は主点位置、焦点距離、せん断係数、放射方向歪み係数および接線方向歪み係数を未知量とした数学モデルにより相互に補われているものと判断される。
- ・カメラキャリブレーションは画素構造の違いや堅牢性を考慮すると、内部標定要素10個のキャリブレーションモデルの利用が妥当であると判断された。
- ・内部標定要素を繰り返し利用した場合には、ほぼ全ての機種で精度低下を示し最大で12倍、最小で1.5倍、平均で4倍の精度低下が確認された。

以上の結果から、画像ごとに10個の内部標定要素を考慮したカメラキャリブレーションを実施することにより、民生用デジタルカメラによる高精度デジタル写真測量は十分に達成されるものと判断される。

(受付日2010.3.9, 受理日2010.7.9)

参考文献

- 高橋洋二, 近津博文, 2008. 民生用デジタルカメラの内部標定要素と計測精度の関係に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, 47(5), pp.71-76.
- 高橋洋二, 近津博文, 2009. 近接デジタル写真測量におけるカメラ付き携帯電話の精度検証, 写真測量とリモートセンシング, 48(5), pp.299-307.
- 近津博文, 国井洋一, 中田隆司, 2001. デジタル写真測量からみた300万画素デジタルスチルカメラの精度検証, 写真測量とリモートセンシング, 40(2), pp.33-38.
- 近津博文, 他3名, 2003. 民生用デジタルスチルカメラによるデジタル写真測量システム“3DiVision”の構築, 写真測量とリモートセンシング, 42(3), pp.6-16.
- Abdel-Aziz Y.I., 1982. Accuracy of the Normal Case of Close-Range Photogrammetry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(2), pp.207-213.
- Brown D.C., 1971. Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering, 37(8), pp.855-866.
- Doerstel .C., Jacobsen K., Stallmann D., 2003. DMC-Photogrammetric Accuracy-Calibration Aspects and Generation of Synthetic DMC Images, Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. I, pp.74-82.
- Faugeras O.D., Toscani G., 1987. Camera Calibration for 3D Computer Vision, Proc. of International Workshop on Industrial Application of Machine Vision and Machine Intelligence, IEEE TH0166-9, pp.240-247.
- Fraser, C.S., 1997. Digital camera self-calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 52(4), pp.149-159.
- Fraser C.S., Hanley H.B., 2004. Developments in Close-Range Photogrammetry for 3D Modelling The Iwitness Example, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-5/W1, ISSN pp.1682-1777.
- Fraser C.S., 1996. Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, pp.256-281.
- Habib A.F., Morgan M.F., 2003. Automatic calibration of low-cost digital cameras, Optical Engineering, 42(4), pp.948-955.
- Karara H.M., Abdel-Aziz Y.I., 1974. Accuracy Aspects of Non-Metric Imageries, Photogrammetric Engineering, 40(10), pp.1107-1130.
- Laebe T., Foerstner W., 2004. Geometric Stability of Low-Cost Digital Consumer Cameras. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences, Vol. XXXV, B1, pp.528-534.
- Tsai R.T., 1986. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision, Proceedings CVPR '86, pp.364-374.