非計測用カメラのキャリブレーション結果の評価指標に関する 数値シミュレーション

Numerical Simulation on Indexes to Evaluate Calibration Results of Non-metric Camera

松岡 龍治*・福江 潔也*・長 幸平*・曾根 光男*
須藤 昇*・横塚 英世*・下田 陽久*・松前 義昭*
Ryuji MATSUOKA, Kiyonari FUKUE, Kohei CHO,
Mitsuo SONE, Noboru SUDO, Hideyo YOKOTSUKA,
Haruhisa SHIMODA and Yoshiaki MATSUMAE

Abstract: Many camera calibration methods for a non-metric digital camera have been proposed. However there is no standard procedure to evaluate an estimated distribution of image distortion directly. Calibration results are usually evaluated indirectly by such indexes as root mean square of residuals on image, three dimensional measurement errors of control points, or error estimates of obtained camera parameters. Therefore, we conducted a numerical simulation in order to examine capabilities of these indexes. In the simulation nine images were supposed to be acquired vertically to shoot control points on four layers disposed at regular intervals of the depth. Seven sets of control points were prepared, and these sets varied in the depth of the distribution of control points from 2/3 to 1/96 of the average camera height. Numerical simulation results show the limits of capabilities of these indexes. Error estimates of obtained camera parameters may be the most effective, however it is very difficult to interpret values of the error estimates obtained in a camera calibration. The authors propose that a set of numerical simulations should be conducted in a camera calibration to evaluate calibration results in addition to conventional evaluation by using the abovementioned indexes.

1. はじめに

近年、一般向けデジタルカメラの画素数は急速に増大している。2003年7月現在、500万画素の一般向けデジタルカメラが10万円以下で入手可能となっている。このようなデジタルカメラの高画素化は、一般向けデジタルカメラの利用分野を写真測量などの画像計測分野に広げるものである。

高画素化された非計測用デジタルカメラを計測分野で利用するためには、使用するデジタルカメラの

キャリブレーションを行い、撮影される画像の幾何歪み分布を推定する必要がある。非計測用デジタルカメラを対象としたカメラキャリブレーション手法については、既に幾つかの手法が提案されており、著者らも、現在、非計測用デジタルカメラのキャリブレーションシステムを開発中である。

しかし、非計測用デジタルカメラのキャリブレーション結果を評価する方法については、まだ十分に検討されているとは言えない状況であり、確立した評価方法も存在していない。例えば、あるカメラキャリブレーションによって得られた画像の幾何歪み分布がどの程度の誤差を有しているのかを示す指標が何であるのか、あるいはどの程度信頼できる幾何歪み分布であるのかを示す指標が何であるのかはまだ明らかになっていない。また、あるカメラキャリブレーション手法が開発されたとき、その手法が有用であるかどうかを

*東海大学情報技術センター

Tokai University Research & Information Center

〒151-0063 東京都渋谷区富ヶ谷2-28-4

2-28-4 Tomigaya, Shibuya-ku, Tokyo 151-0063

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 42, NO. 6, 2003

判断する基準となる指標が何であるのかも定まっていない。

そこで、まず、カメラキャリブレーション結果の評価に現在用いられている各種の指標が、得られた画像の幾何歪み分布の正確さをどの程度表しているかを調べるための数値シミュレーションを行ったので、ここに報告する。

なお、本論文では、幾何歪み分布の推定精度に関して、推定値のばらつきの尺度(狭義の精度に相当する)を精密さ(precision)、これに対して、推定値の偏りの尺度を正確さ(accuracy: 確度)とよぶことにし、ばらつきと偏りの両方を含めた尺度を精度とよぶことにする。

2. カメラキャリブレーション手法とカメラキャリブレーション結果の評価方法

コンピュータビジョンでは、画像の幾何学/幾何モデルを決定することをカメラキャリブレーションとよび、画像の撮影位置や撮影方向を決定すること(写真測量での外部標定)もカメラキャリブレーションに含めて考えている。しかし、本論文では、写真測量の考え方に従い、画像の撮影位置や撮影方向を決定することをカメラキャリブレーションに含めないことにする。また、撮影された画像の幾何学的内部歪みの分布は、数個～十数個のパラメータを用いた関数で表すことが一般的であることから、本論文では、この画像の幾何歪み分布を表す関数(以後、幾何歪み関数とよぶ)を推定することをカメラキャリブレーションとよぶことにする。

2.1 カメラキャリブレーション手法

写真測量で用いるカメラのキャリブレーションに関する研究は、まず航空カメラを対象として行われ、その後1960年代後半から1980年代にかけて地上写真測量用カメラを対象として数多くの研究がなされた。当時の代表的な研究者であるD.C. Brownの研究成果は文献1)などにまとめられている。1980年代には、非計測用カメラのキャリブレーションについての研究が行われるようになった^{2),3)}。1990年代に入り、一般向けデジタルカメラを用いた計測の試みが始まり、デジタルカメラのキャリブレーションに関する研究も始まった。我が国では近津らの研究が既に報告されてい

る^{4),5)}。

デジタルカメラのキャリブレーションの代表的な方法には、以下のような方法がある^{6),7)}。

(1) 実験室での光学的カメラキャリブレーション

マルチコリメータやゴニオメータなどの機器を用いて光学的に行う方法で、通常カメラメーカーの実験室などで行われる。高い精度で幾何歪み分布を推定できるため、計測用カメラに対しては一般的に行われている方法ではあるが、費用や時間が掛かるため、非計測用カメラに対してはほとんど行われていない。

(2) 精密基準点を利用したカメラキャリブレーション

実験室や野外のテストフィールドに、3次元位置を精密に測定した基準点を用意し、それを撮影した画像から幾何歪み分布を推定する方法である。基準点の3次元位置を精密に測定するには、費用と時間が掛かるため、基準点の数はあまり多くないのが一般的である。

(3) 多数の標識を利用したカメラキャリブレーション

実験室や野外のテストフィールドに、多数の標識を設置し、それを撮影した画像から幾何歪み分布を推定する方法である。標識の3次元位置を精密に測定する必要がないため、(2)の方法に比べてかなり簡便である。

2.2 カメラキャリブレーション結果の評価方法

非計測用デジタルカメラのキャリブレーションは、前節で述べた3つの方法のうち、(1)実験室での光学的カメラキャリブレーション以外の(2)精密基準点を利用したカメラキャリブレーション、あるいは(3)多数の標識を利用したカメラキャリブレーションで行うことが一般的であると考えられる。この場合、対象となるカメラで撮影された画像を用いて、バンドル法などにより解析的に幾何歪み分布を推定することになる。

しかし、推定された幾何歪み分布を直接評価する方法はまだ確立されていない。このため、現時点では、推定された幾何歪み分布の評価は、幾何歪み関数の各パラメータの推定値やその推定誤差の大きさが妥当であるかどうかを主観的、経験的にチェックすることによって行われているだけである。

従来カメラキャリブレーションに関する研究においても、推定された幾何歪み分布を直接評価する試みはほとんど行われていない。カメラキャリブレーション

ン結果の評価は、以下に示す指標あるいはこれと同等の指標によって行われるのが一般的である。

(1) 基準点・標定点の画像座標の残差

観測の正確さを表す指標である。バンドル法などの標定計算で得られる値で、基準点・標定点の画像座標の計測精度を表す。幾何歪み関数の適合性や有効性を評価するために用いられる場合もある。定量的な評価基準を設定しやすい指標である。

(2) 基準点・参照点の地上座標の誤差

画像座標の残差と同様に、観測の正確さを表す指標である。標定計算で得られる外部標定要素と幾何歪み分布を用いて計算される値で、画像座標の計測精度を表す。幾何歪み関数の適合性や有効性を評価するために用いられる場合も多い。この指標も定量的な評価基準を設定しやすい。

(3) パラメータの推定誤差

標定計算で得られる外部標定要素や幾何歪み関数の各パラメータの推定値の推定誤差の分散あるいは標準偏差として求められ、カメラキャリブレーションの精密さを表す指標である。しかし、推定された個々の幾何歪み関数の正確さを表してはいない。この指標については、定量的な評価基準を設定することが難しい。

例えば、アナログの非測定用カメラに関する研究では、文献2)において、上記の指標(1)と(3)がカメラキャリブレーションの有効性の評価に用いられている。また文献3)では、指標(1)と(2)を用いて各種幾何歪みモデルの妥当性の検討を行っている。非測定用デジタルカメラに関する研究においても、文献4)では、(1)～(3)の3つの指標すべてを用いて実験結果の評価を行っている。また文献5)では、指標(2)を用いて幾何歪み関数のパラメータの選択を行っている。さらに昨年(2002年)発表されたカメラキャリブレーションに関する論文でも、文献8)では指標(1)と(2)が、文献9)では(1)と(3)が、また文献10)では指標(2)と同等の指標がカメラキャリブレーション結果の評価に用いられている。

3. 数値シミュレーション

カメラキャリブレーションの結果を評価するために現在用いられている3つの指標 ((1)基準点・標定点の画像座標の残差, (2)基準点・参照点の地上座標の誤差, (3)パラメータの推定誤差)の定性的な特徴は、2.2で述

べた通りである。しかし、実際のカメラキャリブレーションにおいて、推定された幾何歪み分布の精度をこれらの指標がどの程度評価できるかはまだ明らかにされていない。そこで、実際のカメラキャリブレーションではこれらの指標がどのような値となり、幾何歪み分布の推定精度をどの程度表しているかを調べるため、数値シミュレーションを実施した。

カメラキャリブレーション結果を評価する指標に関する検討を数値シミュレーションで行った理由は、数値シミュレーションには以下のような利点があるためである。

- (1) 予想していない要因による幾何歪みの混入を防ぐことができる。
- (2) 幾何歪み分布の再現性を評価することが可能である。
- (3) 画像座標の計測精度を制御できる。
- (4) 基準点の地上座標の計測精度に依存しない解析ができる。
- (5) 多額の実験費用を必要としない。

3.1 想定したカメラキャリブレーション

数値シミュレーションでは、図1に示すように、奥行き方向に4層に配置された基準点を鉛直下向きに撮影した3×3枚、合計9枚の画像を用いたカメラキャリブレーションを想定した。

非測定用カメラのキャリブレーションでは、取れん撮影された画像を用いることが多いが、このように平行撮影された画像を用いるカメラキャリブレーションを想定した理由は、基準点の奥行き方向の間隔を変えるだけで、幾何歪み分布の推定精度を変化させること

図1 想定するカメラキャリブレーションの概要

ができる点である。十分大きな間隔の基準点を用いたカメラキャリブレーションでは、高い精度で幾何歪み分布を推定することができ、基準点の分布が平面に近い場合には、幾何歪み分布の推定精度が低くなる。なお、平行撮影された画像を用いたカメラキャリブレーションでも有効な成果が得られているとの報告もある^{3)~5)}。

以下、この想定したカメラキャリブレーションの概要について述べる。

3.1.1 基準点

基準点は、水平方向（XY 方向）に等間隔に格子状に配置された基準点を 1 層とし、奥行き方向（Z 方向）に等間隔に 4 層配置する。表 1 に示すように、水平方向の間隔は、カメラキャリブレーションに用いる基準点数の違いによる影響を検討するため、0.960m×0.960m (L)、0.640m×0.640m (M)、0.320m×0.320m (H) の 3 種類とし、それぞれ各層には 6 点×6 点、8 点×8 点、16 点×16 点が配置され、全体ではそれぞれ 144 点、256 点、1024 点の基準点が配置されるようにした。なお、基準点の地上座標には計測誤差がないものとして解析を行った。

基準点の奥行き方向（Z 方向）の間隔を、表 1 に示すように、0.640m、0.320m、0.160m、0.080m、0.040

m、0.020m、0.010m と変化させた 7 種類のデータセット Z-1～Z-7 を用意した。後述するように、カメラキャリブレーションに使用する 9 枚の画像の撮影地点の Z 座標の平均値 H が 2.880m であるため、基準点の最上層（T2 層）と最下層（B2 層）との Z 座標の差 D_z と H の比は 2/3 ～ 1/96 となる。

以上のように、基準点（地上座標 XYZ の組）データセットの数は、水平方向の間隔の異なる L、M、H の 3 種類に、奥行き方向の間隔の異なる Z-1～Z-7 の 7 種類を組み合わせた 21 である。

3.1.2 画像

カメラキャリブレーションに用いる画像は、基準点の上方から鉛直下方に撮影した 3×3 枚、合計 9 枚の画像とした。上下左右に隣り合う画像では、 $Z=0$ において最低 50% のオーバーラップが確保されるように、撮影位置を設定した。各画像の概略の撮影範囲を図 2 に示す。基準点の配置が等間隔であるため、画像の撮影位置には若干のばらつきを持たせることにし、それぞれの画像の撮影位置を表 2 に示す通り設定した。なお、使用した 9 枚の画像の撮影地点の Z 座標の平均値 H は中央の画像 CC の撮影地点の Z 座標と同じ 2.880m である。

基準点の画像座標の u 座標、 v 座標、それぞれ独立

表 1 基準点の配置

	タイプ	点数	点間隔 d (m)	座 標 (m)	座標差 D (m)	D_z/H
X 方向	X-L	6	0.960	-2.400～+2.400	4.800	
	X-M	8	0.640	-2.240～+2.240	4.480	
	X-H	16	0.320	-2.400～+2.400	4.800	
Y 方向	Y-L	6	0.960	-2.400～+2.400	4.800	
	Y-M	8	0.640	-2.240～+2.240	4.480	
	Y-H	16	0.320	-2.400～+2.400	4.800	
Z 方向	Z-1	4	0.640	-0.960～+0.960	1.920	2/3
	Z-2	4	0.320	-0.480～+0.480	0.960	1/3
	Z-3	4	0.160	-0.240～+0.240	0.480	1/6
	Z-4	4	0.080	-0.120～+0.120	0.240	1/12
	Z-5	4	0.040	-0.060～+0.060	0.120	1/24
	Z-6	4	0.020	-0.030～+0.030	0.060	1/48
	Z-7	4	0.010	-0.015～+0.015	0.030	1/96

H ：撮影地点の Z 座標の平均値（ $H=2.880\text{m}$ ）

-1~Z-7の7種類に、L-3、M-3、H-3、M-2、M-6の5種類を組み合わせた35となる。

3.1.3 カメラ

本研究では、現在の非計測用カメラによる計測が主にデジタルカメラで行われることを考慮して、対象となるカメラをデジタルカメラとした。このカメラの幾何歪みモデルについては3.1.4にて説明する。想定したデジタルカメラの諸元は、著者らが現在開発中のカメラキャリブレーションシステム¹¹⁾のフィールド実験で得られたオリンパス光学工業(株)製 CAMEDIA E-10の値と、倉敷紡績(株)製の3次元写真計測システム Kuraves-K¹²⁾によって計測された同じカメラの値を参考にして、表3のように設定した。著者らの開発中のシステムも Kuraves-K も収れん撮影された画像を用いてカメラキャリブレーションを行うものである。なお、表3に示した Kuraves-K の幾何歪み関数のパラメータの値は、Kuraves-K で得られた画素を単位とした値を、画素ピッチの値を用いて換算した値である。

数値シミュレーションで用いるカメラは CAME-DIA E-10とほぼ同等であるとした。ただし、画像サイズを縦方向に大きくし、正方形の画像が撮影されるように設定した。また、市販のカメラの公称焦点距離には数%の誤差があることから、画面距離の誤差を2.5%とし、他の幾何歪み関数のパラメータの値は、フィールド実験や Kuraves-K で得られた結果を参考にして、できるだけ丸めた値を設定した。

※基準点 (●) の配置タイプは X-H/Y-H

図2 キャリブレーションに用いる画像の概略の撮影範囲 (Z=0)

に標準偏差 σ_l が $1/3$ 画素 ($3\sigma_l = 1$ 画素) である正規乱数の観測誤差を加えたデータセット L-3、M-3、H-3 と、画像座標の観測誤差がカメラキャリブレーション結果に与える影響を評価するため、観測誤差の標準偏差 σ_l が $1/2$ 画素 ($3\sigma_l = 3/2$ 画素) となるデータセット M-2 と $1/6$ 画素 ($3\sigma_l = 1/2$ 画素) となるデータセット M-6 を準備した。データセット L-3、M-3、H-3、M-2、M-6 の具体的な内容については3.1.5で説明する。

画像基準点 (地上座標 XYZ と画像座標 uv の組)

データセットの数は、奥行き方向の間隔の異なる Z

表2 画像の撮影位置

	<W>		<C>		<E>	
	画像 NW		画像 NC		画像 NE	
<N>	X_0	(m) -1.040	X_0	(m) -0.080	X_0	(m) 1.040
	Y_0	(m) 1.200	Y_0	(m) 1.120	Y_0	(m) 1.200
	Z_0	(m) 2.840	Z_0	(m) 2.920	Z_0	(m) 2.840
	画像 CW		画像 CC		画像 CE	
<C>	X_0	(m) -1.120	X_0	(m) 0.000	X_0	(m) 1.120
	Y_0	(m) 0.080	Y_0	(m) 0.000	Y_0	(m) -0.080
	Z_0	(m) 2.920	Z_0	(m) 2.880	Z_0	(m) 2.920
	画像 SW		画像 SC		画像 SE	
<S>	X_0	(m) -1.040	X_0	(m) 0.080	X_0	(m) 1.040
	Y_0	(m) -1.200	Y_0	(m) -1.120	Y_0	(m) -1.200
	Z_0	(m) 2.840	Z_0	(m) 2.920	Z_0	(m) 2.840

表3 数値シミュレーションでの設定値

	設定値	E-10 フィールド実験	E-10 Kuraves-K
撮像素子	9.0mm×9.0mm	2 / 3 型	2 / 3 型
画素ピッチ	4.0μm×4.0μm	3.9μm×3.9μm	3.9μm×3.9μm
記録画素数	2,250×2,250	2,240×1,680	2,240×1,680
レンズ焦点距離 (mm)	9.000	9.000	9.000
主点距離 c (mm)	9.225	9.230	9.264
放射方向 レンズ歪み	k_1 (mm ⁻²) k_2 (mm ⁻⁴) k_3 (mm ⁻⁶)	2.000000×10^{-3} -1.500000×10^{-5} -2.000000×10^{-7}	2.181742×10^{-3} -2.101446×10^{-5} 0.000000×10^{-8}
非対称性 レンズ歪み	p_1 (mm ⁻¹) p_2 (mm ⁻¹)	1.000000×10^{-4} -1.000000×10^{-4}	1.957940×10^{-5} -7.644905×10^{-5}
主点位置のずれ x_p (画素) y_p (ライン)	20.00 -20.00	-19.59 -22.63	-15.17 -16.09

3.1.4 幾何歪みモデル

画像の幾何歪みのうち、デジタルカメラの機構に起因する幾何歪みモデルとして、以下の式(1)で表されるモデル¹³⁾を想定した。このモデルやこのモデルの一部の項を省略したモデルは、写真測量やコンピュータビジョンの分野で現在よく用いられている幾何歪みモデルで、文献2), 3), 5), 8), 10)においてもほぼ同様の幾何歪みモデルが用いられている。

このモデルでは、写真座標が (x, y) である点の幾何歪み $(\Delta x, \Delta y)$ は、

$$\begin{cases} \Delta x = x_p + \left(\frac{\Delta c}{c_0} \right) \bar{x} + \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \quad + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y} \\ \Delta y = y_p + \left(\frac{\Delta c}{c_0} \right) \bar{y} + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \quad + 2p_1\bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) \\ \Delta s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 \\ \bar{x} = x - x_p \\ \bar{y} = y - y_p \end{cases} \quad (2)$$

と表される。ここで、 c_0 は公称画面距離（あるいは公称焦点距離）、 Δc は実際の画面距離 c と c_0 との差、 (x_p, y_p) は主点位置のずれ、 $k_1 \sim k_3$ はレンズの放射方向歪曲収差を表す項の係数、 p_1 と p_2 はレンズエレメントの光軸の不整などに起因する非対称性の歪みを表す項の係数である。主点位置のずれは、撮影された画像の中心から計測することとする。また、 Δs は幾何歪み $(\Delta x, \Delta y)$ の絶対値であり、今回の数値シミュレーション

図3 設定したカメラの幾何歪み分布（絶対値 Δs ）

ンで設定したカメラの Δs の分布を、参考のため、図3に示す。

3.1.5 解析に用いたデータセット

数値シミュレーションでは、奥行き方向の間隔の異なる7種類の基準点データセットZ-1～Z-7それぞれについて、表4に示す5種類のデータセットを組み合わせた、合計35のデータセットを用いて解析を行った。

- (1) データセットM-3は、カメラキャリブレーションに用いる基準点が64点で、画像座標の観測誤差の標準偏差が1/3画素である。
- (2) データセットL-3とH-3は、カメラキャリブレーション

表 4 解析に用いたデータセット (Z-1～Z-7それぞれについて)

データ セット	観測誤差の 標準偏差	基 準 点					サブセット数
		配 列		サブセットごとの点数			
		X 方向	Y 方向	XY 平面	Z 方向	総数	
L-3	1 / 3 画素	X-L	Y-L	9	4	36	4
M-2	1 / 2 画素	X-M	Y-M	16	4	64	4
M-3	1 / 3 画素	X-M	Y-M	16	4	64	4
M-6	1 / 6 画素	X-M	Y-M	16	4	64	4
H-3	1 / 3 画素	X-H	Y-H	64	4	256	4

ションに用いる基準点数がカメラキャリブレーション結果の評価指標に与える影響を調べるためのデータセットである。画像座標の観測誤差の標準偏差は M-3 と同様に 1 / 3 画素であるが、基準点はそれぞれ 36 点、256 点である。

- (3) データセット M-2 と M-6 は、画像座標の観測誤差がカメラキャリブレーション結果の評価指標に与える影響を調べるためのデータセットである。基準点は M-3 と同様に 64 点であるが、画像座標の観測誤差の標準偏差はそれぞれ 1 / 2 画素と 1 / 6 画素である。

Z-1～Z-7 と M-3, L-3, H-3, M-2, M-6 を組み合わせた 35 の解析用画像基準点 (地上座標 XYZ と画像座標 uv の組) データセットそれぞれについて、各層の基準点を 4 グループに分けたサブセットを準備した。1 つのサブセットの基準点数は、M-3, M-2, M-6 で 1 層あたり 16 点、合計で 64 点、L-3 で 1 層あたり 9 点、合計で 36 点、H-3 で 1 層あたり 64 点、合計で 256 点となる。幾何歪み関数の推定はこのサブセットを用いて行った。

今後、カメラキャリブレーションで幾何歪み関数の推定に用いるサブセットを推定用データセットとよび、推定された幾何歪み関数を利用した 3 次元計測に用いるデータセットを利用用データセットとよぶことにする。推定用データセットは上述のサブセットで、合計 140 セットあり、利用用データセットは M-3 (256 基準点) の Z-1～Z-7 の 7 データセットとした。

3.1.6 数値シミュレーションでの解析

数値シミュレーションでは、以下の解析を行った。

(1) カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションはサブセット (推定用データセット) ごとに行った。Z-1～Z-7 と M-3, L

-3, H-3, M-2, M-6 の組み合わせごとに、4 サブセットを解析対象としたので、合計で 140 ケースの解析を行った。

(2) 3 次元計測

(1) カメラキャリブレーションで求められた外部標定要素および幾何歪み関数を用いて、(1) カメラキャリブレーションで用いた基準点の中で、複数の画像に撮影されている基準点の地上座標を前方交会法によって求めた。(1) カメラキャリブレーションと同様に、サブセットごとに実施したので、合計で 140 ケースとなった。

- (3) 幾何歪み関数利用時の 3 次元計測 (外部標定あり)
以下の手順で 3 次元計測を行った。

- ① ある推定用データセットを用いてカメラキャリブレーションを行う ((1) に相当)。
- ② ① で求められた幾何歪み関数を利用して、ある利用用データセットを用いた外部標定を行う。
- ③ ① で求められた幾何歪み関数と② で得られた外部標定要素を用いて、② で用いた利用用データセットの基準点の中で、複数の画像に撮影されている基準点の地上座標を前方交会法によって求める。

カメラキャリブレーションが 140 ケース、利用用データセットが 7 データセットあるため、3 次元計測は合計で 980 ケース実施した。

- (4) 幾何歪み関数利用時の 3 次元計測 (外部標定なし)
以下の手順で 3 次元計測を行った。

- ① ある推定用データセットを用いてカメラキャリブレーションを行う ((1) に相当)。
- ② ① で求められた幾何歪み関数と、ある利用用データセットの各画像の撮影位置・撮影方向の設定値を用いて、その利用用データセットの基準点の中で、複数の画像に撮影されている基準点の地

上座標を前方交会法によって求める。

カメラキャリブレーションが140ケース、利用用データセットが7データセットあるため、3次元計測を合計で980ケース実施した。

3.1.7 カメラキャリブレーション結果の評価指標

カメラキャリブレーション結果を評価する指標として、本研究では以下に示す6つの指標を取り上げた。

(1) 標定残差： V_p

カメラキャリブレーションの標定計算における基準点 i の画像座標の残差を (v_{xi}, v_{yi}) とするとき、以下の式で表される v_{si} の2乗平均の平方根（画像座標残差 RMS）である。

$$v_{si} = (v_{xi}^2 + v_{yi}^2)^{1/2} \quad (3)$$

(2) 3次元計測誤差： E_{XY}, E_Z

カメラキャリブレーションで求められた外部標定要素および幾何歪み関数を用いて計算される推定用データセットの基準点 i の地上座標の誤差を (e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}) とするとき、以下の式で表される相対精度 r_{XYi}, r_{Zi} の2乗平均の平方根である。

$$\begin{cases} r_{XYi} = \frac{(e_{xi}^2 + e_{yi}^2)^{1/2}}{H - Z_i} \\ r_{Zi} = \frac{e_{zi}}{H - Z_i} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 Z_i は基準点 i の Z 座標、 H は9枚の画像の撮影地点の Z 座標の平均値を表し、 $H = 2.880\text{m}$ である。

(3) 幾何歪み関数のパラメータの推定誤差： σ_c, σ_p

カメラキャリブレーションで求められる幾何歪み関数のパラメータの推定誤差の標準偏差である。今回は、値の意味が理解しやすい画面距離 c 、主点位置のずれ (x_p, y_p) の推定誤差 $\sigma_c, (\sigma_{xp}, \sigma_{yp})$ を対象とすることにした。ただし、主点位置のずれについては、推定誤差 $(\sigma_{xp}, \sigma_{yp})$ そのものでなく、以下の式(5)で計算されるその絶対値 σ_p を検討対象とした。

$$\sigma_p = (\sigma_{xp}^2 + \sigma_{yp}^2)^{1/2} \quad (5)$$

(4) 幾何歪み関数利用時の3次元計測誤差（外部標定あり）： E_{XY}^0, E_Z^0

ある推定用データセットを用いたカメラキャリブレーションで求められた幾何歪み関数を利用して、利用用データセットを用いた外部標定を行う。その結果より計算される利用用データセットの基準点 i の地上座標の誤差を (e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}) とするとき、式(4)

で計算される相対精度 r_{XYi}, r_{Zi} の2乗平均の平方根である。

(5) 幾何歪み関数利用時の3次元計測誤差（外部標定なし）： E_{XY}^S, E_Z^S

ある推定用データセットを用いたカメラキャリブレーションで求められた幾何歪み関数と利用用データセットの各画像の撮影位置・撮影方向の設定値を用いて計算される利用用データセットの基準点 i の地上座標の誤差を (e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}) とするとき、式(4)で計算される相対精度 r_{XYi}, r_{Zi} の2乗平均の平方根である。

(6) 幾何歪みの再現誤差： D_T

求められた幾何歪み関数で計算される幾何歪み分布が、設定した幾何歪み関数で計算される幾何歪み分布とどれだけ異なるかを示す値である。それぞれの幾何歪み関数を用いて、画像のすべての画素 $(2,250 \times 2,250 \text{画素})$ における幾何歪み $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ を計算し、その幾何歪みの差 $d\Delta s_i$ の2乗平均の平方根 (RMS) で表すことにする。

$$d\Delta s_i = \{(\Delta x_i^{(T)} - \Delta x_i^{(S)})^2 + (\Delta y_i^{(T)} - \Delta y_i^{(S)})^2\}^{1/2} \quad (6)$$

ここで、上付添え字 $^{(T)}$ は評価対象となる推定された幾何歪み関数を、また上付添え字 $^{(S)}$ は評価基準となる設定した幾何歪み関数を表す。この幾何歪みの差 D_T は、カメラキャリブレーションによる幾何歪み分布の再現性を示す指標となる。

指標(1)～(3)が通常カメラキャリブレーション時に計算される評価指標である。これに対し、指標(4)、(5)は通常のカメラキャリブレーションでは評価に用いられることはほとんどない。また、指標(6)は数値シミュレーションでのみ求めることのできる値であり、実際のカメラキャリブレーションでは求めることができない。

3.2 数値シミュレーションの結果とその考察

解析用データセット M-3 (Z-1～Z-7) を用いて実施した、幾何歪み関数を考慮しない外部標定28ケースでは、標定残差 V_p が6.87～9.31画素、基準点の3次元計測誤差 E_{XY}, E_Z が、それぞれ1.44～2.89%、5.60～9.00%であった。これらの結果は、以下に示す幾何歪み関数を考慮する場合に得られる結果に比べてかなり悪い結果である。

以下、数値シミュレーションで得られた結果とそれに関する考察を、カメラキャリブレーション結果を評価する指標ごとに分けて示す。なお、以下に示す図4、

5, 7~10, 12の横軸のZ-1~Z-7は推定用データセットを示し、図11の横軸のZ*-1~Z*-7は利用用データセットを示している。また、図4, 7~9では、Z-1~Z-7それぞれの4ケースの平均値を線で横方向に結び、さらに、L-3, M-3, H-3の結果について、4ケースの最大値と最小値を短い水平線で示し、その間を鉛直線で結んでいる。

3.2.1 幾何歪みの再現誤差 D_T

まず、推定された幾何歪み分布の正確さを直接表す幾何歪みの再現誤差 D_T を図4に示す。図4が示すように、 D_T は、基準点の奥行き方向の分布を反映した値となっている。また D_T には、画像座標の観測誤差の大きさ、カメラキャリブレーションに用いる基準点数も影響を与えていることがわかる。

画像座標の観測誤差の大きさや基準点数にもよるが、今回の数値シミュレーションでは、基準点の奥行き方向の分布が広い推定用データセット Z-1~Z-3 によるキャリブレーションは十分な精度であると判断できるのに対し、分布が狭い推定用データセット Z-5~Z-7 によるキャリブレーションでは十分な精度が得られないと判断できよう。さらに、Z-5~Z-7 では、基準点の奥行き方向の分布が同じである4ケースの D_T のばらつきが、 D_T の値が大きくなるに従って、大きくなっている。また、その絶対値そのものもかなり大きく、画像座標の観測誤差が小さいケースや、カメラキャリブレーションに用いる基準点数が多いケースの D_T の値が、観測誤差の大きいケースや基準点数が少ないケースの D_T の値よりも大きい場合も発生している。

3.1.7で述べたように、 D_T の値は実際のカメラキャリブレーションでは求めることができないものであ

る。しかし、同じカメラに対するキャリブレーションを数回実施して、得られた幾何歪み関数を用いて計算される幾何歪み分布の差を、 D_T の計算と同様に式(6)を用いて計算し、そのばらつきを評価することにより、キャリブレーション結果を間接的に評価することは意味があることと思われる。

なお、推定された幾何歪み関数の再現性を示す結果として、推定用データセット M-3 で得られた画面距離 c と主点位置の設定位置からの距離 Δp を、サブセットごとに記号を替えて、図5に示す。 Δp は、キャリブレーションで得られた主点位置のずれを $(x_p^{(T)}, y_p^{(T)})$ 、設定した主点位置のずれを $(x_p^{(S)}, y_p^{(S)})$ とすると、次式(7)で計算される値である。

$$\Delta p = \{(x_p^{(T)} - x_p^{(S)})^2 + (y_p^{(T)} - y_p^{(S)})^2\}^{1/2} \quad (7)$$

基準点の奥行き方向の分布が広い Z-1~Z-3 によるキャリブレーションでは、かなり正確に c や (x_p, y_p) が再現され、そのばらつきも小さい。一方、分布が狭い Z-5~Z-7 によるキャリブレーションでは、値のばらつきが大きく、設定値とのずれも大きくなっている。ただし、高い再現性を示す結果も存在している。

(a) 得られた画面距離 c

(b) 得られた主点位置の設定位置からの距離 Δp

図5 キャリブレーションで得られた画面距離 c と主点位置の設定位置からの距離 Δp (M-3)

図4 幾何歪みの再現誤差 D_T

(a) 画面距離 c と幾何歪みの再現誤差 D_T

(b) 主点位置の設定位置からの距離 Δp と幾何歪みの再現誤差 D_T

図6 キャリブレーションで得られたパラメータと幾何歪みの再現誤差 D_T (M-3)

また、この推定用データセット M-3で得られた画面距離 c 、主点位置の設定位置からの距離 Δp と幾何歪みの再現誤差 D_T との関係を図6に示す。 D_T は Δp にほぼ比例しているが、 c に関しては、設定値に近い値でも D_T が大きくなるケースがあった。このことから、幾何歪み分布の再現性と幾何歪み関数のパラメータの再現性は、必ずしも一致するものでないことがわかる。

3.2.2 標定残差 V_P

図7に標定残差 V_P を示す。 V_P の値は、基準点の奥行き方向の分布 (Z-1~Z-7) によって変化せず、ほぼ一定の値となっている。しかし、3.2.1に示したように、カメラキャリブレーションで得られる幾何歪み分布の

図7 標定残差 V_P

(a) 3次元計測誤差 E_{XY} (XY平面)

(b) 3次元計測誤差 E_Z (Z方向)

図8 3次元計測誤差 E_{XY} , E_Z

精度は用いた基準点の奥行き方向の分布によって異なる点から考えて、 V_P はカメラキャリブレーション結果を評価する指標として適当でない場合があると言える。

3.2.3 3次元計測誤差 E_{XY} , E_Z

図8に3次元計測誤差 E_{XY} , E_Z を示す。 E_{XY} , E_Z の値は、基準点の奥行き方向の分布 (Z-1~Z-7) によ

てほとんど変化せず、ほぼ一定の値となっている。カメラキャリブレーションで得られる幾何歪み分布の精度は用いた基準点の奥行き方向の分布によって異なるため、 E_{xy} , E_z は、標定残差 V_P と同様に、カメラキャリブレーション結果を評価する指標として適当でない場合があると言える。

3.2.4 幾何歪み関数のパラメータの推定誤差 σ_c , σ_p

図9の(a)に画面距離の推定誤差 σ_c を、(b)に主点位置のずれの推定誤差 σ_p を示す。 σ_c , σ_p は、図4に示す幾何歪みの再現誤差 D_T と同様に、基準点の奥行き方向の分布 (Z-1~Z-7) を反映した値となっており、カメラキャリブレーション結果を評価する指標となり得ると判断される。

しかし、 D_T とは異なり、基準点の奥行き方向の分布が狭い場合、例えば Z-5~Z-7 においては、基準点の奥行き方向の分布が同じである4ケースの σ_c , σ_p のばらつきが小さい。このことより、 σ_c , σ_p がほぼ同じ値であっても、幾何歪み分布の推定精度が大きく異なる場

合もあり得ることがわかる。

また、あるカメラキャリブレーションで得られた σ_c や σ_p などのパラメータの推定誤差の値から、推定された幾何歪み関数による幾何歪み分布の誤差がどの程度となるかや、推定された幾何歪み関数を用いた場合の3次元計測精度がどの程度となるかを予測することは難しい。このことが、パラメータの推定誤差の値の解釈を難しくしていると考えられる。例えば、 σ_c の値が 0.010mm であった場合に、そのカメラキャリブレーションの精度が十分であると判断するか、あるいは不十分であると判断することは非常に難しい。 σ_p についても同様で、 σ_p の値が2.0画素であった場合はどのように解釈すべきか、あるいは1.0画素であった場合はどうかなど、判断に迷う場合がありうる。既往のカメラキャリブレーションに関する研究においても、キャリブレーション結果の一部として、パラメータの推定誤差の値を記載していることはあるが、値そのものに対する評価やコメントはないことがほとんどである^{2),4),9)}。

パラメータの推定誤差の値をきちんと解釈するには、カメラキャリブレーションに関する十分な知識や経験が必要であると考えられる。この知識や経験を得るのに、カメラキャリブレーションの数値シミュレーションも有効であると考えられる。

3.2.5 幾何歪み関数利用時の3次元計測誤差 $E_{xy}^{\oplus}$, $E_z^{\oplus}$ (外部標定あり)

図10に、キャリブレーションで得られた幾何歪み関数を利用して3次元計測を行うときに外部標定を行う場合の計測誤差 $E_{xy}^{\oplus}$, $E_z^{\oplus}$ を示す。図10では、Z-1~Z-7 それぞれについてカメラキャリブレーションで推定された4種類の幾何歪み関数を用いた3次元計測28ケース（幾何歪み関数4種類×利用データセット7セット）の平均値を線で横方向に結んでいる。さらに、M-3の結果については、28ケースの最大値と最小値を短い水平線で示し、その間を鉛直線で結んでいる。

この $E_{xy}^{\oplus}$, $E_z^{\oplus}$ は、図4に示した幾何歪みの再現誤差 D_T と同様に、基準点の奥行き方向の分布 (Z-1~Z-7) を反映した値となっており、カメラキャリブレーション結果を評価する指標となり得るように見える。だが、図8に示した推定用データセット M-3を用いた3次元計測の誤差 E_{xy} , E_z と、この図10に示した利用データセットを用いた3次元計測の誤差 $E_{xy}^{\oplus}$, $E_z^{\oplus}$

図9 画面距離と主点位置のずれの推定誤差 σ_c , σ_p

(a) 3次元計測誤差 $E_{XY}^{(0)}$ (XY平面)

(b) 3次元計測誤差 $E_Z^{(0)}$ (Z方向)

図10 幾何歪み関数利用時の3次元計測誤差 $E_{XY}^{(0)}$, $E_Z^{(0)}$ (外部標定あり)

では、基準点の奥行き方向の分布が広い Z-1～Z-4 においては特に大きな違いはないが、分布が狭い Z-5～Z-7 においては、値やそのばらつきの大きさがかなり異なっている。

そこで、推定用データセット M-3 の Z-1, Z-3, Z-5, Z-7 を用いて推定された幾何歪み関数を利用したときの $E_{XY}^{(0)}$, $E_Z^{(0)}$ を利用用データセットごとに図11に示す。図11の横軸の Z*-1～Z*-7 は利用用データセットを示し、Z-1, Z-3, Z-5, Z-7 それぞれの4種類の幾何歪み関数を用いた3次元計測の平均値を線で横方向に結んでいる。さらに、Z-5, Z-7 の結果については、4ケースの最大値と最小値を短い水平線で示し、その間を鉛直線で結んでいる。

推定用データセット Z-1, Z-3 の $E_{XY}^{(0)}$, $E_Z^{(0)}$ は、利用用データセットの基準点の奥行き方向の分布 (Z*-1～Z*-7) によってほとんど変化していない。これに対し、Z-5, Z-7 の $E_{XY}^{(0)}$, $E_Z^{(0)}$ の値やそのばらつきの大きさは、利用用データセットの基準点の奥行き方向の分布によって変化し、特に Z-7 ではその変化量が大きい。そし

(a) 3次元計測誤差 $E_{XY}^{(0)}$ (XY平面)

(b) 3次元計測誤差 $E_Z^{(0)}$ (Z方向)

図11 Z-1, Z-3, Z-5, Z-7 で推定された幾何歪み関数を利用した3次元計測誤差 $E_{XY}^{(0)}$, $E_Z^{(0)}$

て、Z-5 の結果は Z*-3～Z*-7 において、Z-7 の結果は Z*-5～Z*-7 において、Z-1 や Z-3 の結果とほぼ同じ値となっている。

このことより、基準点の奥行き方向の分布が狭い推定用データセット (例えば、Z-5～Z-7) を用いて推定された幾何歪み分布 (その推定精度は低い) を用いる3次元計測では、基準点の奥行き方向の分布が広い利用用データセット (例えば、Z*-1～Z*-3) を対象とする場合には計測精度が低くなるが、基準点の奥行き方向の分布が狭い利用用データセット (例えば、Z*-5～Z*-7) を対象とする場合には計測精度が低下しないことがわかる。

つまり、利用用データセットを用いた3次元計測の誤差 $E_{XY}^{(0)}$, $E_Z^{(0)}$ は、利用用データセットの基準点の奥行き方向の分布が推定用データセットの基準点の奥行き方向の分布より狭い場合には、カメラキャリブレーション結果を評価する指標とはなり得ないことになる。

また逆に、外部標定を行った後に3次元計測を行う

ときに、計測対象の奥行き方向の分布より広い奥行き方向の分布を有する基準点を用いたカメラキャリブレーションで推定した幾何歪み分布を利用するならば、幾何歪み分布を高精度で推定する必要がないことも示唆している。

3.2.6 幾何歪み関数利用時の3次元計測誤差 $E_{XY}^{(S)}$, $E_Z^{(S)}$ (外部標定なし)

図12に、キャリブレーションで得られた幾何歪み関数を利用して3次元計測を行うときに画像の撮影位置・撮影方向を指定する場合の3次元計測誤差 $E_{XY}^{(S)}$, $E_Z^{(S)}$ を示す。図12では、Z-1～Z-7それぞれについてカメラキャリブレーションで推定された4種類の幾何歪み関数を用いた3次元計測28ケース（幾何歪み関数4種類×利用データセット7セット）の平均値を線で横方向に結んでいる。さらに、M-3の結果については、28ケースの最大値と最小値を短い水平線で示し、その間を鉛直線で結んでいる。

(a) 3次元計測誤差 $E_{XY}^{(S)}$ (XY平面)

(b) 3次元計測誤差 $E_Z^{(S)}$ (Z方向)

図12 幾何歪み関数利用時の3次元計測誤差 $E_{XY}^{(S)}$, $E_Z^{(S)}$ (外部標定なし)

この $E_{XY}^{(S)}$, $E_Z^{(S)}$ は、図4に示した幾何歪みの再現誤差 D_r と同様に、基準点の奥行き方向の分布 (Z-1～Z-7) を反映した値となっており、カメラキャリブレーション結果を評価する指標となり得ると判断される。

カメラキャリブレーションで推定された幾何歪み関数を利用して3次元計測を行うときに、外部標定を行わずに、画像の撮影位置・撮影方向を指定する場合の $E_{XY}^{(S)}$, $E_Z^{(S)}$ の値は、外部標定によって画像の撮影位置・撮影方向を推定する場合の $E_{XY}^{(S)}$, $E_Z^{(S)}$ の値より非常に大きな値となる。また、幾何歪み分布の推定精度が $E_{XY}^{(S)}$, $E_Z^{(S)}$ に与える影響も非常に大きいこともわかる。

4. まとめ

今回の数値シミュレーションは、カメラキャリブレーションに用いる画像の撮影方法や基準点の配置、幾何歪み関数の選定などに関して、かなり限定された条件下で実施されたものであるが、現在カメラキャリブレーションの結果を評価するために用いられている3つの指標 ((1)基準点・標定点の画像座標の残差, (2)基準点・参照点の地上座標の誤差, (3)パラメータの推定誤差) では、推定された幾何歪み分布の精度を十分に評価することが難しい場合がありうることが確認された。なお、この3つの指標の中では、(3)パラメータの推定誤差がキャリブレーション結果を評価するのに最も適当であると考えられるが、このパラメータの推定誤差については、得られた値の解釈が難しいという欠点がある。パラメータの推定誤差の値をきちんと解釈するには、カメラキャリブレーションに関する十分な知識や経験が必要であると考えられるが、この知識や経験を得るのに、カメラキャリブレーションの数値シミュレーションも有効であると考えられる。

カメラキャリブレーションで推定された幾何歪み分布の利用面から見ると、推定された幾何歪み分布を利用して3次元計測を行うときに、外部標定を行うならば、高精度で幾何歪み分布を推定する必要がない場合がありうることがわかった。この場合、パラメータの推定誤差を用いてキャリブレーション結果を評価すると、正確ではないが、有用な幾何歪み分布を採択しないことも起こり得る。これに対し、ラジコンヘリにデジタルカメラとGPSとを同時に搭載し、デジタルカメラで撮影された画像を用いて3次元計測を行う場

合¹⁴⁾などで、外部標定を行わずに、GPSなどの計測装置で得られる画像の撮影位置・撮影方向を利用して3次元計測を行うには、幾何歪み分布をできるだけ高精度で推定することが必要であることが確認された。

画像の幾何歪み分布を高精度で推定しようとするときのカメラキャリブレーションでは、1組の画像を用いたキャリブレーションを1回だけ行い、キャリブレーション結果の評価に現在用いられている3つの指標の値を求めるだけでは不十分であると考えている。異なる画像の組み合わせによるキャリブレーションを複数回実施し、得られた幾何歪み分布のばらつきを評価することや、得られた幾何歪み関数のパラメータの値を用いた数値シミュレーションを複数回行い、その結果のばらつきを評価することなどが必要であると考えている。

今後、取れん撮影された画像の利用など実際に行われているカメラキャリブレーションにより即した数値シミュレーションを実施し、上記の3つの評価指標に関する検討をさらに進める予定である。

(受付日2003.7.8, 受理日2003.9.10)

参考文献

- 1) D.C. Brown, "Calibration of Close-Range Cameras", *International Archives of Photogrammetry*, vol. 19, no. 5, 1972.
- 2) 那須 充, 手持ちカメラのセルフ・カリブレーション, *APA*, vol. 11, no. 4, pp.20-25, 1980.
- 3) S. Murai, R. Matsuoka and T. Okuda, "A Study on Analytical Calibration for Non Metric Camera and Accuracy of Three Dimensional Measurement", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 25, Part B5, pp.570-579, 1984.
- 4) 近津博文, 中野一也, 穴井哲治, 村井俊治, リアルタイムフォトグラメトリのためのCCDカメラキャリブレーション, 写真測量とリモートセンシング, vol. 35, no. 2, pp.4-10, 1996.
- 5) 近津博文, 国井洋一, 中田隆司, デジタル写真測量からみた300万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, vol. 40, no. 2, pp. 33-38, 2001.
- 6) J.G. Fryer, "Camera Calibration", *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, K.B. Atkinson Ed., Whittler Publishing, pp.156-179, 1996.
- 7) C.S. Fraser, "Photogrammetric Camera Component Calibration", *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*, A. Gruen and T.S. Huang Eds., Springer-Verlag, pp.95-121, 2001.
- 8) T. Noma, H. Otani, T. Ito, M. Yamada and N. Kochi, "New System of Digital Camera Calibration, DC-1000", *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, pp.54-59, 2002.
- 9) A.F. Habib, S.W. Shin and M.F. Morgan, "New Approach for Calibrating Off-the-Shelf Digital Camera", *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium*, Part A, pp.144-149, 2002.
- 10) M. Wiggenghagen, "Calibration of Digital Consumer Cameras for Photogrammetric Applications", *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium*, Part B, pp.301-304, 2002.
- 11) R. Matsuoka, K. Fukue, K. Cho, H. Shimoda, Y. Matsumae, K. Hongo, and S. Fujiwara, "A Study on Calibration of Digital Camera", *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium*, Part B, pp. 176-180, 2002.
- 12) クラボウ エレクトロニクス事業部, Kuraves V. 2.0.0 オペレーションマニュアル カメラレンズ歪み補正編, 2001.
- 13) J.G. Fryer and D.C. Brown, "Lens Distortion for Close range Photogrammetry", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, no. 1, pp.51-58, 1986.
- 14) チームベルーガ, ラジコンヘリの特徴と測量への応用, 北海道東海大学空間情報システム研究会シンポジウム「21世紀の空間情報システム」講演スライド, 2001.
(<http://www.htokai.ac.jp/ES/HATANAKA/gis/kaiin/sympo/beluga.pdf> (2003年 1 月10日 現在))