非計測用デジタルカメラのキャリブレーションにおける 幾何歪みモデルの未知パラメータの選択に関する検討

A Study on Selection of Unknown Parameters of Image Distortion Model in Calibration of Non-metric Digital Camera

松岡 龍治*・福江 潔也*・曾根 光男*

須藤 昇*・横塚 英世*

*Ryuji MATSUOKA, Kiyonari FUKUE, Mitsuo SONE,
Noboru SUDO and Hideyo YOKOTSUKA*

Abstract: Many camera calibration methods for a non-metric digital camera have been proposed. Most of them adopt polynomials of image coordinates composed of terms representing the correction to the principal distance, the offsets of the principal point, the radial lens distortion, and the decentering lens distortion of the target camera as the image distortion model in the calibration. However, few reports on selection of unknown parameters of the image distortion model in the calibration evaluate an estimated distribution of image distortion directly. Therefore, we conducted a numerical simulation on selection of unknown parameters of the ordinary image distortion model widely used for camera calibration. Evaluation of calibration results was performed by differences of image distortions calculated at all pixels on the image between the obtained image distortion model and the setup one. The simulation results indicate that an image distortion model without the terms representing the decentering lens distortion of the target camera in the calibration cannot necessarily provide a reliable distribution of the image distortion. The authors propose selecting all parameters of the widely used image distortion model as unknowns in the camera calibration.

1. はじめに

一般向けデジタルカメラの画素数は年々増大しており、2004年12月現在、800万画素の一般向けデジタルカメラが10万円程度で入手可能となっている。近年言われてきているように、このようなデジタルカメラの画素数の増大は、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ようとするものである。

非計測用デジタルカメラを計測分野で利用するには、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。カメラの光学系および CCD や CMOS などの撮像素子の大きさがほとんど変わらずに、画素数が増大すると、画素を単位としてみた幾何歪みは増大することになる。このため、非計測用デジタルカメラの画素数が増大するにつれて、カメラキャリブレーションの重要性も増大することになると言えよう。

カメラキャリブレーションでは、画像の幾何歪み分布を表すモデル（以後、幾何歪みモデルとよぶ）として、どのようなモデルを選定するかが重要である。本論文は、非計測用デジタルカメラのキャリブレーションにおいて、幾何歪みモデル中のどのパラメータを未知数として解析を行うかによって、推定される幾何歪み分布がどのように異なるかを調べるために行った数値シミュレーションの報告である。

*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. 44, NO. 1, 2005

2. カメラキャリブレーションにおける未知パラメータの選択

本論文では、松岡らの報告(2004)にならい、撮影された画像の幾何学的内部歪みの分布を、数個～数十個のパラメータを用いた関数で表すこととし、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。

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、既に多くの手法が提案されているが、そのほとんどが、対象となるカメラで撮影された画像を用いて、解析的に幾何歪み関数を求める方法であり、次の2つの方法がおもに用いられている(Fryer, 1996; Fraser, 2001)。(1)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。ほとんどの場合、基準点は3次元空間中に十分な奥行き方向の分布を有するように配置される。(2)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。ほとんどの場合、標識は2次元平面上に配置され、その数は100を超えることが多い。また、収れん撮影を行うことが一般的となっている。

これらの手法で用いられている幾何歪み関数のほとんどが、画面距離の誤差、主点位置のずれ、レンズの放射方向歪曲収差、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、画像座標の多項式で表現したものである。しかし、手法によって、放射方向歪曲収差を表す項の次数が異なっていたり、非対称性の歪みを表す項を考慮していなかったりする。また、現在市販されている非計測用デジタルカメラに対応した画像計測ソフトウェアには、その機能の1つとして、カメラキャリブレーション機能が含まれているものもあるが、そのようなソフトウェアの中にも、幾何歪み関数の項を選択できるものもある(EOS Systems Inc., 2003)。

幾何歪み関数の項の選択に関しては、非計測用アナログカメラに対する村井らの研究(1984)がある。村井らは、画面距離の誤差、主点位置のずれ、放射方向歪曲収差、非対称性の歪み、フィルム変形による歪みを考慮した幾何歪み関数を対象として、未知数として取り扱うべき項を選択しようとした。基準点の奥行き

方向の分布が撮影距離の $1/5 \sim 1/13$ となるように配置された41点の基準点をほぼ平行に撮影した写真8枚を用いて解析を行い、基準点の写真座標の平均2乗誤差で評価を行った。

また、非計測用デジタルカメラのキャリブレーションに対する研究には、近津ら(2001)が多数のデジタルカメラのキャリブレーションを行った結果の報告がある。近津らは、放射方向歪曲収差と非対称性の歪みを考慮した幾何歪みモデルを対象として、基準点の奥行き方向の分布が撮影距離の $1/16 \sim 1/40$ となるように配置された9点の基準点をほぼ平行に撮影した画像2枚を用いて解析を行った。検証点の画像座標の平均2乗誤差で、未知数として取り扱うべき項を選択しようとした。

しかし、カメラキャリブレーションで推定された幾何歪み分布を直接評価することによって、幾何歪みモデル中の未知パラメータの選択を行おうとした報告はほとんどない。さらに、松岡ら(2004)は、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、基準点・標定点の画像座標の残差、基準点・検証点の地上座標の誤差、未知パラメータの推定値の標準偏差などの指標では、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を報告している。

3. 数値シミュレーション

非計測用デジタルカメラのキャリブレーションにおいて、幾何歪みモデルの未知数として扱うパラメータの組み合わせによって、得られる幾何歪み分布の推定精度がどのように異なるかを調べるため、数値シミュレーションを実施した。

数値シミュレーションでは、写真測量やコンピュータビジョンで広く用いられている、画面距離の誤差、主点位置のずれ、レンズの放射方向歪曲収差、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考慮した幾何歪みモデルを対象として、放射方向歪曲収差を表す項の一部や非対称性の歪みを表す項を考慮しない場合の幾何歪み分布の推定精度と、これらの項の係数を未知数として解析を行った場合の幾何歪み分布の推定精度とを比較した。

カメラキャリブレーションにおける幾何歪みモデルの未知パラメータの選択に関する検討を数値シミュ

レーションによって行った理由は、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。

- (i) 推定された幾何歪み分布の精度を直接評価することができる。
- (ii) 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。
- (iii) 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。
- (iv) 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、以下に示すように、3次元空間中に分布する地上座標が既知である基準点（以後、3次元基準点とよぶことにする）を用いたカメラキャリブレーション（方法Z）と、2次元平面上に分布する地上座標が未知である標定点（以後、2次元標定点とよぶことにする）を用いたカメラキャリブレーション（方法P、方法M）を想定した。前者の方法Zは、2.で述べたカメラキャリブレーション方法の(1)に属するもので、後者の方法Pと方法Mは(2)に属するものである。カメラキャリブレーション方法の違いが、幾何歪みモデルの未知パラメータの選択に影響を与える可能性があるかどうか調査するため、これら3方法を想定した。表1に、想定したカメラキャリブレーションの概要を示す。

(1) 方法Z

松岡らの研究(2004)における数値シミュレーションとはほぼ同様の方法である。奥行き方向に4層に配置された3次元基準点64点を鉛直下向きに平行撮影した2×3枚、合計6枚の画像をキャリブレーションに用いる。図1に方法Zの概要を、図2(a)に方法

図1 想定したカメラキャリブレーション方法Z

Zにおける基準点の配置と画像の撮影範囲を示す。

松岡らの研究（2004）で、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では、基準点の奥行き方向の間隔によって、幾何歪み分布の推定精度が変化し、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ることが示されていることを参考にして、3段階の基準点の奥行き方向の間隔を設定した。

(2) 方法P

EOS Systems Inc. 製の PhotoModeler Pro 5 のカメラキャリブレーション方法（EOS Systems Inc., 2003）に準じた方法で、100点の2次元標定点が印刷されたキャリブレーションシートを水平面上に置き、それを周囲の4点より収れん撮影した画像8枚をキャリブレーションに用いる。図2(b)に方法Pにおける2次元標定点の配置、画像の撮影位置、撮影方向、撮影範囲を示す。

表1 想定したカメラキャリブレーション方法

		方法Z			方法P	方法M
画像	撮影方法	平行撮影			収れん撮影 (俯角45°)	収れん撮影 (俯角45°)
	撮影地点数	6 地点			4 地点	8 地点
	解析処理数	6 枚			8 枚	8 枚
標定点 基準点	分布	3 次元			2 次元	2 次元
	D_z/H	Z-1 1 / 5	Z-2 1 / 10	Z-3 1 / 20	0	0
	座標	既知			未知	未知
参 照 図		図 1, 図 2(a)			図 2(b)	図 2(c)

(a) 方法 Z

(b) 方法 P

(c) 方法 M

図2 標定点・基準点の配置と画像の撮影範囲

(3) 方法 M

Matsuoka, et al. (2003) によるキャリブレーション

ン方法に準じた方法で、2次元標定点が印刷されたキャリブレーションシートを水平面上に置き、それを周囲の8点より取れん撮影した画像8枚をキャリブレーションに用いる。図2(c)に方法Mにおける2次元標定点の配置、画像の撮影位置、撮影方向、撮影範囲を示す。

以下、この想定したカメラキャリブレーションについて説明する。

3.1.1 基準点/標定点

(1) 方法 Z

水平方向 (XY 方向) に等間隔に格子状に配置された基準点 (図2(a)の白丸) を1層とし、奥行き方向 (Z 方向) に等間隔に4層配置する。水平方向の間隔は $0.320\text{m} \times 0.320\text{m}$ とし、各層には8点 $\times$ 8点が配置され、全体では256点の3次元基準点を配置されるようにした。基準点の奥行き方向 (Z 方向) の間隔を、 0.120m , 0.060m , 0.030m と変化させた3種類のデータセット Z-1, Z-2, Z-3 を用意した。カメラキャリブレーションに使用する画像の撮影地点の高さ H が 1.800m であるため、3次元基準点の最上層と最下層との Z 座標の差 D_z と H の比 D_z/H はそれぞれ $1/5$, $1/10$, $1/20$ となる。

カメラキャリブレーションでは、同一の平面位置となる点が1点だけとなるように、各層の基準点を4グループに分けたサブセットを用いた。各サブセットは、1層あたり16点、合計で64点の3次元基準点となり、解析では3次元基準点の地上座標は既知であり、その計測誤差はないものとした。

(2) 方法 P

水平方向 (XY 方向) に等間隔に、10点 $\times$ 10点、合計100点の標定点が格子状に配置されたキャリブレーションシートを用いる。標定点の間隔は $0.200\text{m} \times 0.200\text{m}$ である。図2(b)の白丸で示された2次元標定点100点が解析に用いられた。地上座標系を規定するため、標定点のうち2点の (X , Y , Z) 座標と1点の Z 座標を与え、残りの97点の地上座標は未知であるとして解析を行った。

(3) 方法 M

水平方向 (XY 方向) に $0.200\text{m} \times 0.200\text{m}$ の間隔で、標定点が格子状に配置されたキャリブレーションシートを用いる。キャリブレーションシートは、キャリブレーションに用いる画像全体にわたって標

定点が撮影されるだけの大きさがあるものとした。

異なる撮影地点から撮影された複数の画像に撮影されている標定点（図2(c)の白丸）をキャリブレーションに用いることとし、使用した点数は解析ケースによって異なるが、418～486点の2次元標定点が解析に用いられた。方法Pと同様に、地上座標系を規定するため、標定点のうち2点の(X, Y, Z)座標と1点のZ座標を与え、残りの点の地上座標は未知であるとして解析を行った。

3.1.2 画 像

各画像の撮影範囲を図2に示すが、この撮影範囲は、3.1.3で述べる想定対象カメラCAMEDIA E-10で撮影される画像の概略の撮影範囲であり、もう1つの想定対象カメラであるPowerShot G2で撮影される画像の撮影範囲はこれより若干広くなる。

(1) 方法Z

3次元基準点の上方から鉛直下向きに平行撮影した2×3枚、合計6枚の画像を用いる。各撮影地点の高さを1.800mとし、上下左右に隣り合う画像では、4層256点の3次元基準点の重心を含む水平面(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、平面位置を設定した。なお、基準点の配置が等間隔であるため、平面位置には若干のばらつきを持たせた。図2(a)に6枚の画像(L-1, L-2, L-3, R-1, R-2, R-3)のZ=0における概略の撮影範囲を示す。

(2) 方法P

水平面上に設置されたキャリブレーションシートを、4方向から傾斜角（俯角）45°で撮影する。各撮

影地点の高さを1.900mとし、キャリブレーションシートの中心が画像の中心となるように平面位置を設定した。また、各撮影地点では、カメラを光軸の周りに回転させずに撮影した画像1枚と、右あるいは左に90°回転させて撮影した画像1枚の合計2枚の画像を撮影する。

図2(b)において、図の中心に向かう4本の矢印の元が撮影地点[1]～[4]を表し、矢印の先が画像の中心のキャリブレーションシート上での位置を表している。実線で示した台形がカメラを光軸の周りに回転させずに撮影した画像の撮影範囲を表し、破線で示した台形がカメラを光軸の周りに右あるいは左に90°回転させて撮影した画像の撮影範囲を表している。表2に各撮影地点でのカメラの回転状況を示す。なお、表2の撮影地点は、便宜上、図2(b)の上を北とした表現方法で示してある。

(3) 方法M

水平面上に設置されたキャリブレーションシートを、8方向から傾斜角（俯角）45°で撮影する。各撮影地点の高さを1.900mとし、平面位置は8枚の画像に共通に撮影される範囲の面積が最大となるように設定した。また、表2に示すように、8カ所の撮影地点[1]～[8]のうち、[1]と[4]を除いた6地点では、カメラを光軸の周りに回転させて撮影を行う。なお、表2の撮影地点は、便宜上、図2(c)の上を北とした表現方法で示してある。

図2(c)において、図の中心部に向かう8本の矢印の元が撮影地点[1]～[8]を表し、矢印の先が画像の中心のキャリブレーションシート上での位置を表している。実線で示した台形がカメラを光軸の周り

表2 画像の撮影地点およびカメラの回転角

	方法 P			方法 M		
	撮影地点	カメラの回転	回転角	撮影地点	カメラの回転	回転角
画像1	[1] 北	なし	0°	[1] 北	なし	0°
画像2	[1] 北	右に90°	-90°	[2] 北東	上下反転	180°
画像3	[2] 東	なし	0°	[3] 東	左に90°	+90°
画像4	[2] 東	右に90°	-90°	[4] 南東	なし	0°
画像5	[3] 南	なし	0°	[5] 南	右に90°	-90°
画像6	[3] 南	左に90°	+90°	[6] 南西	左に90°	+90°
画像7	[4] 西	なし	0°	[7] 西	上下反転	180°
画像8	[4] 西	左に90°	+90°	[8] 北西	右に90°	-90°

に回転させずに撮影した画像と180°回転させて撮影した画像の撮影範囲を表し、破線で示した台形がカメラを光軸の周りに右あるいは左に90°回転させて撮影した画像の撮影範囲を表している。

すべての方法において、基準点・標定点の画像座標の u 座標, v 座標, それぞれ独立に標準偏差 σ_l が 1 / 6 画素 ($3\sigma_l = 1 / 2$ 画素) である正規乱数の観測誤差を加えたデータセットを準備した。この σ_l の値は, 3.1.3 で述べる想定対象カメラ CAMEDIA E-10および PowerShot G2の実機に対して行った PhotoModeler Pro 5 によるカメラキャリブレーション (3.1.4参照) での Point Marking Residuals の Overall RMS の値, 0.079画素 (E-10) および0.263画素 (G2) を参考にして設定した。

3.1.3 カメラ

本研究で想定したデジタルカメラは、オリンパス光学工業(株)製 CAMEDIA E-10 (以後、E-10と略す) およびキャノン(株)製 PowerShot G2(以後、G2と略す) の2機種とした。これらのデジタルカメラの諸元を表3に示す。画像計測では、広角レンズが使われることが多いため、数値シミュレーションでは、ズームレンズの最も広角側の焦点距離(表3で*をつけた焦点距離)を対象とした。なお、カメラの幾何歪みモデルについては、次項で述べる。

3.1.4 幾何歪みモデル

[1] 幾何歪みモデルを表す多項式

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 (Fryer, *et al.*, 1986) 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、那須 (1980), 村井ら

(1984), 近津ら (2001), Noma, *et al.* (2002) の研究においても、ほぼ同様の幾何歪みモデルが用いられている。なお、アナログカメラに対するモデルでは、フィルム変形による歪みを表す項が追加されていることがある。

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、

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

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

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。

数値シミュレーションでは、式(1)で表されるモデルを、レンズの放射方向歪曲収差を表す項が主点から測った放射方向の距離 (以後、放射方向距離とよぶことにする) r の7次式で表され、非対称性の歪みを表す項が含まれていることから、モデル R7D とよぶことにする。また、このモデル R7D 以外に、 $p_1 = p_2 = 0$ として非対称性の歪みを表す項を省略したモデル R7、 $k_3 = 0$ として放射方向歪曲収差を表す項の r の7次項を省略したモデル R5D、 $k_3 = p_1 = p_2 = 0$ として放射方向歪曲収差を表す項の r の7次項と非対称性の歪みを表す項を省略したモデル R5、 $k_2 = k_3 = 0$ として放射方向

表3 想定したデジタルカメラ

	CAMEDIA E-10	PowerShot G2
撮像素子	2 / 3 型 CCD	1 / 1.8型 CCD
画素ピッチ	3.9μm×3.9μm	3.125μm×3.125μm
記録画素数	2,240画素×1,680ライン	2,272画素×1,704ライン
レンズ焦点距離 (35mm フィルム換算)	9 * ~36mm (35* ~140mm)	7 * ~21mm (34* ~102mm)

*：数値シミュレーションで対象とした焦点距離

表 4 想定した幾何歪みモデル

モデル		R7D	R7	R5D	R5	R3D	R3
画面距離	c	○	○	○	○	○	○
放射方向歪曲収差	k_1	○	○	○	○	○	○
	k_2	○	○	○	○	×	×
	k_3	○	○	×	×	×	×
非対称性の歪み	p_1, p_2	○	×	○	×	○	×
主点位置のずれ	(x_p, y_p)	○	○	○	○	○	○

○：考慮する（設定時：表 5 に示した値を設定，解析時：未知扱い）

×：考慮しない（設定時： c は公称値，その他は 0 を設定，解析時：既知扱い）

表 5 数値シミュレーションでの設定値

(a) CAMEDIA E-10

CAMEDIA E-10		計 測 値		設 定 値					
		PhotoModeler Pro 5	Matsuoka, <i>et al.</i> の方法	モデル R7D	モデル R7	モデル R5D	モデル R5	モデル R3D	モデル R3
画面距離	c (mm)	9.183	9.163	9.162	9.162	9.163	9.163	9.128	9.128
放射方向	k_1 (mm^{-2})	2.279×10^{-3}	2.134×10^{-3}	2.130×10^{-3}	2.130×10^{-3}	2.160×10^{-3}	2.160×10^{-3}	1.510×10^{-3}	1.510×10^{-3}
放射方向	k_2 (mm^{-4})	-2.573×10^{-5}	-2.026×10^{-5}	-2.030×10^{-5}	-2.030×10^{-5}	-2.260×10^{-5}	-2.260×10^{-5}		
レンズ歪み	k_3 (mm^{-6})	5.113×10^{-8}	-5.342×10^{-8}	-5.340×10^{-8}	-5.340×10^{-8}				
非対称性	p_1 (mm^{-1})	8.323×10^{-5}	9.249×10^{-5}	9.250×10^{-5}		9.250×10^{-5}		9.250×10^{-5}	
レンズ歪み	p_2 (mm^{-1})	2.595×10^{-5}	3.798×10^{-5}	3.800×10^{-5}		3.800×10^{-5}		3.800×10^{-5}	
主点位置	x_p (画素)	-19.33	-19.59	-20.00	-21.00	-20.00	-21.00	-20.00	-21.00
のずれ	y_p (ライン)	-22.42	-22.63	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00

(b) PowerShot G2

PowerShot G2		計 測 値		設 定 値					
		PhotoModeler Pro 5	Matsuoka, <i>et al.</i> の方法	モデル R7D	モデル R7	モデル R5D	モデル R5	モデル R3D	モデル R3
画面距離	c (mm)	7.200	7.191	7.189	7.189	7.188	7.188	7.156	7.156
放射方向	k_1 (mm^{-2})	3.500×10^{-3}	2.972×10^{-3}	2.970×10^{-3}	2.970×10^{-3}	2.910×10^{-3}	2.910×10^{-3}	1.740×10^{-3}	1.740×10^{-3}
放射方向	k_2 (mm^{-4})	-9.087×10^{-5}	-6.863×10^{-5}	-6.860×10^{-5}	-6.860×10^{-5}	-6.100×10^{-5}	-6.100×10^{-5}		
レンズ歪み	k_3 (mm^{-6})	8.772×10^{-7}	2.608×10^{-7}	-2.610×10^{-7}	2.610×10^{-7}				
非対称性	p_1 (mm^{-1})	1.758×10^{-4}	1.732×10^{-4}	1.730×10^{-4}		1.730×10^{-4}		1.730×10^{-4}	
レンズ歪み	p_2 (mm^{-1})	2.550×10^{-4}	3.583×10^{-4}	3.580×10^{-4}		3.580×10^{-4}		3.580×10^{-4}	
主点位置	x_p (画素)	-21.17	-15.97	-16.00	-17.00	-16.00	-17.00	-16.00	-17.00
のずれ	y_p (ライン)	19.47	27.91	28.00	29.00	28.00	29.00	28.00	29.00

歪曲収差を表す項の r の 5 次項と 7 次項を省略したモデル R3D, $k_2=k_3=p_1=p_2=0$ として放射方向歪曲収差を表す項の r の 5 次項と 7 次項および非対称性の歪みを表す項を省略したモデル R3を対象とした。表 4 にこれらの幾何歪みモデルにおけるパラメータの取り扱い方を示す。以後，数値シミュレーションで使用するデータセットを準備するのに用いたモデルを設定モ

デル，カメラキャリブレーションで適用するモデルを解析モデルとよぶことにする。表 4 で○をつけたパラメータは，設定モデルでは，以下に説明する表 5 に示した値が設定され，解析モデルでは未知パラメータとして取り扱われる。一方，×をつけたパラメータは，設定モデルでは， c は c_0 が，その他は 0 が設定され，解析モデルでは既知パラメータ（ c は c_0 ，その他は 0）

として取り扱われる。なお、解析モデルの未知パラメータの初期近似値は、 c は c_0 、その他は 0 とした。

[2] 異なる幾何歪み分布間の差を表す指標

以下の議論で用いられる、異なる幾何歪み分布間の差を表す指標を次のように定義する。

基準とする一方の幾何歪み関数 S で計算される画素 i の幾何歪みを $(\Delta x_i^{(S)}, \Delta y_i^{(S)})$ 、対象とする他方の幾何歪み関数 T で計算される画素 i の幾何歪みを $(\Delta x_i^{(T)}, \Delta y_i^{(T)})$ とする。画素 i における幾何歪みの差 $d\Delta s_i$ を次式(3)によって計算する。

$$d\Delta s_i = \sqrt{(\Delta x_i^{(T)} - \Delta x_i^{(S)})^2 + (\Delta y_i^{(T)} - \Delta y_i^{(S)})^2} \quad (3)$$

撮影される画像のすべての画素 (E-10では $2,240 \times 1,680$ 画素, G2では $2,272 \times 1,704$ 画素) において計算される幾何歪みの差 $d\Delta s_i$ の2乗平均の平方根 (RMS) D_r (式(4)) を、異なる幾何歪み分布間の差を表す指標とする。

$$D_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d\Delta s_i)^2} \\ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{(\Delta x_i^{(T)} - \Delta x_i^{(S)})^2 + (\Delta y_i^{(T)} - \Delta y_i^{(S)})^2\}} \quad (4)$$

ここで、 N は全画素数 (E-10では3,763,200画素, G2では3,871,488画素) である。

[3] 幾何歪み関数のパラメータの設定値

カメラキャリブレーションの対象と想定したディジタルカメラ E-10および G2の実機の幾何歪み関数を、EOS Systems Inc. 製の PhotoModeler Pro 5 (EOS Systems Inc., 2003) および Matsuoka, *et al.* (2003) による方法で求めた結果を、表 5 にそれぞれ示す。なお、表 5 に示した PhotoModeler Pro 5 による幾何歪み関数のパラメータの値は、表 3 に示した画素ピッチの値を用いて換算した値である。

表 5 に示した実機のキャリブレーションで求められた幾何歪み関数のパラメータの値を参考にして、数値シミュレーションでの想定カメラの幾何歪み関数のパラメータの値を設定した。まず、モデル R7D のパラメータの値を、画面距離は0.001mm 単位、主点位置のずれは0.01画素単位、レンズの放射方向歪曲収差および非対称性の歪みを表す項の係数は有効数字 3 桁で丸めた値で設定した。次に、設定したモデル R7D のパラメータを用いて、画像のすべての画素における幾何歪

み $(\Delta x_i^{(S)}, \Delta y_i^{(S)})$ を計算し、それとの差 $d\Delta s_i$ (式(3)) の2乗和が最も小さくなるように、モデル R7, R5D, R5, R3D, R3のパラメータの値を求め、それをモデル R7D の設定値と同様に丸めた値を設定値とした。表 5 に各モデルのパラメータの設定値を示す。

表 5 に示すように、2機種 E-10, G2ともに、画面距離 c の値は放射方向歪曲収差を表す項の r の次数によって決まり、非対称性の歪みを表す項の有無には影響されない。一方、非対称性の歪みを表す項の係数 p_1 , p_2 の値は放射方向歪曲収差を表す項の r の次数には関係せず、また主点位置のずれ (x_p, y_p) の値は非対称性の歪みを表す項の有無によって変化する。表 5 に示

(a) カメラ E-10/R7D

(b) カメラ G2/R7D

図3 設定したカメラの幾何歪み分布 (絶対値 Δs)

した設定値は最小2乗法によって求められた値を丸めた値であるが、丸める前の値も同じ傾向を示していた。

以下の式(5)で計算される Δs は幾何歪み ($\Delta x, \Delta y$) の絶対値であるが、参考のため、今回の数値シミュレーションで設定した E-10/R7D と G2/R7D の Δs の分布を図3に示す。

$$\Delta s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (5)$$

また、次式(6)に示すように、画面距離の誤差による歪みおよびレンズの放射方向歪曲収差の大きさを表す Δ_R は、放射方向距離 r の関数となるが、このグラフを図4(a)に示す。なお、E-10/R7D, E-10/R5D, E-10/R3D, G2/R7D, G2/R5D, G2/R3D の Δ_R は、それぞれ、非対称性の歪みを表す項がない E-10/R7, E-10/R5, E-10/R3, G2/R7, G2/R5, G2/R3 の Δ_R と等しい。

$$\Delta_R = \left(\frac{\Delta c}{c} \right) r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad (6)$$

レンズの非対称性の歪みについては、Fryer, *et al.*

(a) レンズの放射方向の歪み Δ_R

(b) レンズの非対称性の歪み Δ_D

図4 設定したカメラのレンズ歪み

(1986)にならない、以下の式(7)で計算される放射方向距離 r の関数となる profile Δ_D のグラフを図4(b)に示すことにする。なお、E-10/R7D, E-10/R5D, E-10/R3D の Δ_D は等しく、G2/R7D, G2/R5D, G2/R5D の Δ_D は等しいので、図4(b)には、E-10とG2の2本の曲線のみが描かれている。

$$\Delta_D = (p_1^2 + p_2^2)^{1/2} r^2 \quad (7)$$

一方のモデルを構成する項の集合が他方のモデルを構成する項の集合の部分集合となる2つのモデルの組み合わせについて、その2モデル間の幾何歪み分布の差を表6に示す。表6の関係する項の係数の欄には、一方のモデルにはあり、他方のモデルにはない項の係数を示し、()内に双方のモデルの設定値が異なる項の係数を示す。また、幾何歪みの分布の差として、式(4)で計算される幾何歪みの差 $d\Delta s_i$ の2乗平均の平方根 (RMS) D_T の他に、 $d\Delta s_i$ の最大値も示す。この表6より、放射方向歪曲収差を表す項の r の7次項や非対称性の歪みを表す項の影響が小さいことがわかる。

3.1.5 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、表5に示すように、2機種のカメラE-10とG2について、それぞれ6種類の幾何歪みモデルR7D, R7, R5D, R5, R3D, R3を設定し、合計12種類のカメラ/モデルを解析対象とした。各カメラ/モデルに対し、表4に示すように、すべての項の係数を未知数としたモデルR7D, 非対称性の歪みを表す項の係数を既知 ($p_1 = p_2 = 0$) としたモデルR7, 放射方向歪曲収差を表す項の r の7次項の係数を既知 ($k_3 = 0$) としたモデルR5D, 非対称性の歪みを表す項の係数と放射方向歪曲収差を表す項の r の7次項の係数を既知 ($k_3 = p_1 = p_2 = 0$) としたモデルR5, 放射方向歪曲収差を表す項の r の5次項と7次項の係数を既知 ($k_2 = k_3 = 0$) としたモデルR3D, 非対称性の歪みを表す項の係数と放射方向歪曲収差を表す項の r の5次項と7次項の係数を既知 ($k_2 = k_3 = p_1 = p_2 = 0$) としたモデルR3を適用して解析を行った。設定モデルより未知パラメータが多い解析モデルを適用した解析(例えば、設定モデルをR5, 解析モデルをR7Dとした解析)を行った理由は、高い相関を示す未知パラメータを余分に含んだ解析モデルでも幾何歪み分布の推定精度に影響がないことを確認するためである。

3つの方法Z, 方法P, 方法Mの解析の違いは以下

表 6 設定したモデル間の幾何歪みの分布の差

(a) CAMEDIA E-10

モデル	R7	R5D	R5	R3D	R3
R7D	$p_1, p_2 (x_p, y_p)$	$k_3 (c, k_1, k_2)$	k_3 $(c, k_1, k_2),$ $p_1, p_2 (x_p, y_p)$	$k_2, k_3 (c, k_1)$	$k_2, k_3 (c, k_1)$ $p_1, p_2 (x_p, y_p)$
	0.75画素	0.29画素	0.80画素	5.25画素	5.30画素
	2.23画素	1.97画素	4.20画素	27.17画素	29.39画素
R7			$k_3 (c, k_1, k_2)$		$k_2, k_3 (c, k_1)$
			0.29画素		5.25画素
			1.97画素		27.17画素
R5D			$p_1, p_2 (x_p, y_p)$	$k_2 (c, k_1)$	$k_2 (c, k_1)$ $p_1, p_2 (x_p, y_p)$
			0.75画素	5.53画素	5.58画素
			2.23画素	28.05画素	30.27画素
R5					$k_2 (c, k_1)$
					5.53画素
					28.05画素
R3D					$p_1, p_2 (x_p, y_p)$
					0.75画素
					2.23画素

上段：関係する項の係数

中段：差のRMS

下段：差の最大値

(b) PowerShot G2

モデル	R7	R5D	R5	R3D	R3
R7D	$p_1, p_2 (x_p, y_p)$	$k_3 (c, k_1, k_2)$	k_3 $(c, k_1, k_2),$ $p_1, p_2 (x_p, y_p)$	$k_2, k_3 (c, k_1)$	$k_2, k_3 (c, k_1)$ $p_1, p_2 (x_p, y_p)$
	2.03画素	0.41画素	2.07画素	7.03画素	7.32画素
	6.77画素	2.82画素	9.56画素	34.86画素	41.54画素
R7			$k_3 (c, k_1, k_2)$		$k_2, k_3 (c, k_1)$
			0.41画素		7.03画素
			2.82画素		34.86画素
R5D			$p_1, p_2 (x_p, y_p)$	$k_2 (c, k_1)$	$k_2 (c, k_1)$ $p_1, p_2 (x_p, y_p)$
			2.03画素	6.60画素	6.91画素
			6.77画素	33.50画素	40.19画素
R5					$k_2 (c, k_1)$
					6.60画素
					33.50画素
R3D					$p_1, p_2 (x_p, y_p)$
					2.03画素
					6.77画素

上段：関係する項の係数

中段：差のRMS

下段：差の最大値

の通りである。

(1) 方法 Z

すべての基準点の (X, Y, Z) 座標を与件として解析を行った。幾何歪み関数のパラメータおよび画像の外部標定要素を未知数とし、基準点の画像座標を観測値として、画像座標の残差 2 乗和を最小とするように、幾何歪み関数のパラメータと画像の外部標定要素を同時に決定した。解析では、同一の平面位置となる点は 1 点だけとなるように、各層の基準点を 4 グループに分けたサブセットを用いた。各サブセットは、1 層あたり 16 点、合計で 64 点の基準点であった。方法 Z では、基準点データセット Z-1, Z-2, Z-3 それぞれに対して、各カメラ/モデルについて、6 枚 1 組の画像を 4 組準備し、4 サブセット × 4 組の 16 セットの解析を行った。

(2) 方法 P

地上座標系を規定するため、標定点のうち 2 点の (X, Y, Z) 座標と 1 点の Z 座標を与件とした。幾何歪み関数のパラメータと画像の外部標定要素、および標定点の地上座標を未知数とし、標定点の画像座標を観測値として、画像座標の残差 2 乗和を最小とするように、幾何歪み関数のパラメータと画像の外部標定要素、および標定点の地上座標を同時に決定した。方法 P では、各カメラ/モデルについて、8 枚 1 組の画像を 12 組準備し、12 セットの解析を行った。

(3) 方法 M

方法 P と同様に、標定点のうち 2 点 (X, Y, Z) の座標と 1 点の Z 座標を与件とした。幾何歪み関数のパラメータ、画像の外部標定要素、および標定点の地上座標を未知数とし、標定点の画像座標を観測値として、画像座標の残差 2 乗和を最小とするように、幾何歪み関数のパラメータと画像の外部標定要素、および標定点の地上座標を同時に決定した。方法 M では、各カメラ/モデルについて、8 枚 1 組の画像を 8 組準備し、8 セットの解析を行った。

3.2 数値シミュレーションの結果とその考察

3.2.1 解析に適用する幾何歪みモデルによる違い

解析に適用する幾何歪みモデルの違いによって、幾何歪み分布の推定精度がどの程度異なるかを比較した。幾何歪み分布の推定精度の評価は、松岡らの研究 (2004) にならい、異なる幾何歪み分布間の差を表す指標 D_T (式(4)) で行うことにした。設定した幾何歪み関

数を基準とし、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対象と考えると、この指標 D_T は幾何歪みの再現誤差に相当するので、以後、再現誤差とよぶことにする。

幾何歪みの再現誤差 D_T を、キャリブレーション方法ごとに図 5 ～ 9 に示す。図 5 ～ 9 の横軸は設定した幾何歪みモデル (設定モデル) を表しており、縦軸が解析時に適用した幾何歪みモデル (解析モデル) ごとの再現誤差 D_T の 8 ～ 16 セットの平均値を画素単位で表している。

また、3.1.4 [3] で述べたモデル R7D の設定値モデルから他のモデル R7, R5D, R5, R3D, R3 のパラメータの値を求めた方法、つまりあるモデルを基準として画像のすべての画素における幾何歪みとの差 $d\Delta s_i$ (式(3)) の 2 乗和が最も小さくなるように、他のモデルのパラメータの値を求めた方法を、各設定モデルに適用した結果を表 7 に示す。表 7 には、式(4)で計算される

図 5 幾何歪みの再現誤差 D_T (方法 Z-1)

図6 幾何歪みの再現誤差 D_T (方法 Z-2)

図7 幾何歪みの再現誤差 D_T (方法 Z-3)

幾何歪みの差 $d\Delta s_i$ の 2 乗平均の平方根 (RMS) D_T の他に、 $d\Delta s_i$ の最大値も示す。なお、表 7 の網掛けしてある欄は、 $D_T=0$ となる欄である。表 7 に示した D_T の値は、カメラキャリブレーションにおいて各解析モデルによって得ることが期待される値であると考えることができる。

3 次元基準点を用いる方法 Z では、基準点の奥行き方法の分布が狭くなる (D_z/H の値が小さくなる) につれて推定精度が低下し、Z-3 (図 7) では、適切な解析モデルを選択しても、高い推定精度を得ることが難しいと言える。そこで、方法 Z-3 の結果を考察の対象から除外した。

方法 Z-3 以外の解析結果より、以下のような考察を得た。

(1) どの設定モデルに対しても、解析モデル R5D と解析モデル R7D とはほぼ同じ結果となり、また解析モデル R5 と解析モデル R7 もほぼ同じ結果を示した。

解析結果は、解析モデル R7D/R5D、解析モデル R7/R5、解析モデル R3D、解析モデル R3 の 4 つのグループに大きく分かれた。

(2) 設定モデル R3D に対する解析結果を除くと、キャリブレーション方法によって D_T の絶対値は異なったが、解析モデルの違いによる推定精度の違いの傾向には、異なるキャリブレーション方法間で大きな相違は見られなかった。

(3) 設定モデル R3D に対して、方法 P および方法 M の E-10 の結果は、設定モデル R5D、R7D に対するすべてのキャリブレーション方法の結果と同一の傾向を示した。これに対し、方法 Z および方法 M の G2 の結果は、それに比べて高い推定精度であった。設定モデル R3D に対しては、キャリブレーション方法間に大きな性能の差が存在していることがわかった。

(4) 解析モデル R3 は、設定モデル R3 に対しては、良

図8 幾何歪みの再現誤差 D_T (方法 P)

図9 幾何歪みの再現誤差 D_T (方法 M)

好な結果を得ることができたが、それ以外の設定モデルに対しては、良好な結果を得ることができなかった。特に、設定モデル R5D, R7D に対しては、 D_T の値が表 7 に示した期待値よりはるかに大きな値となった。

- (5) 解析モデル R3D は、設定モデル R3, R3D に対しては、良好な結果を得ることができた。それ以外の設定モデルに対しては、 D_T の値が極端に大きくなることはなかったが、良好な結果を得ることが概ねできなかった。
- (6) 解析モデル R7D/R5D は、どのような設定モデルに対しても、良好な結果が得られた。
- (7) 解析モデル R7/R5 は、設定モデル R7D, R5D, R3D に対しては、 D_T の値が表 7 に示した期待値よりはるかに大きな値となった。

表 6 に示すように、非対称性の歪みを表す項の影響は、RMS の値で、E-10 では 0.75 画素、G2 では 2.03

画素であるのに対し、 D_T の値が、E-10 では 9 画素、G2 では 20 画素程度となった。

- (8) 解析モデル R7/R5 において、設定モデル R7D, R5D, R3D に対して、 D_T の値が大きくなった原因は、以下に述べるように、主点位置のずれ (x_p, y_p) の再現誤差 (設定値と推定値の差) が大きくなったことであつた。

表 8 に、方法 Z-1 / 設定モデル R7D のある解析ケースにおける幾何歪みモデルの未知パラメータ $c, x_p, y_p, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$, および画像 L-2 の未知パラメータである撮影位置 (X_0, Y_0, Z_0), 撮影方向 (ω, ϕ, κ) 間の相関係数を示す。表 8 の太線で囲った欄は相関係数の絶対値が 0.6 以上である。非対称性の歪みの項の係数 p_1, p_2 と相関が高い未知パラメータは、それぞれ、主点位置のずれ x_p, y_p と、画像の撮影方向 ϕ, ω であった。方法 Z-1 / 設定モデル R7D における (x_p, y_p) の再現誤差 (設定値と推定値

表7 パラメータ推定における幾何歪みの誤差

(a) CAMEDIA E-10

D_T		パラメータを推定したモデル				
		R7	R5D	R5	R3D	R3
設定 モデル	R7D	0.49画素	0.01画素	0.49画素	0.79画素	0.93画素
		1.69画素	0.16画素	1.85画素	6.40画素	8.08画素
	R7		0.01画素	0.01画素	0.79画素	0.79画素
			0.16画素	0.16画素	6.40画素	6.40画素
	R5D	0.49画素		0.49画素	0.79画素	0.93画素
		1.69画素		1.68画素	6.22画素	7.91画素
	R5				0.79画素	0.79画素
					6.22画素	6.22画素
	R3D	0.49画素		0.49画素		0.49画素
		1.69画素		1.69画素		1.69画素

上段：誤差のRMS

下段：誤差の最大値

(b) PowerShot G2

D_T		パラメータを推定したモデル				
		R7	R5D	R5	R3D	R3
設定 モデル	R7D	1.33画素	0.02画素	1.33画素	0.95画素	1.63画素
		5.27画素	0.23画素	5.49画素	7.21画素	12.46画素
	R7		0.02画素	0.02画素	0.95画素	0.95画素
			0.23画素	0.23画素	7.21画素	7.21画素
	R5D	1.33画素		1.33画素	0.95画素	1.63画素
		5.27画素		5.27画素	7.43画素	12.68画素
	R5				0.95画素	0.95画素
					7.43画素	7.43画素
	R3D	1.33画素		1.33画素		1.33画素
		5.27画素		5.27画素		5.27画素

上段：誤差のRMS

下段：誤差の最大値

表8 方法Z-1/設定モデルR7Dにおける未知パラメータ間の相関係数

		c	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2	x_p	y_p
c		1.000							
k_1		0.431	1.000						
k_2		-0.405	-0.978	1.000					
k_3		0.381	0.933	-0.987	1.000				
p_1		0.017	-0.007	0.008	-0.007	1.000			
p_2		0.034	0.017	-0.022	0.025	-0.003	1.000		
x_p		0.013	0.019	-0.019	0.019	-0.936	0.007	1.000	
y_p		0.017	-0.006	0.012	-0.016	-0.014	0.824	0.022	1.000
画像 L-2	X_0	-0.046	-0.021	0.025	-0.027	-0.106	0.039	0.226	0.034
	Y_0	-0.066	-0.044	0.056	-0.063	0.092	-0.098	-0.076	-0.210
	Z_0	0.839	-0.075	0.060	-0.045	0.022	0.032	0.004	0.019
	ω	-0.032	-0.039	0.051	-0.061	0.053	0.663	-0.034	0.717
	ϕ	0.033	0.029	-0.031	0.032	-0.890	-0.012	0.886	0.006
	κ	0.004	0.001	-0.002	0.003	0.013	-0.045	-0.013	-0.032

(a) カメラ E-10

(a) カメラ E-10

(b) カメラ G2

(b) カメラ G2

図10 方法 Z-1 / 設定モデル R7D における主点位置のずれの再現誤差 (ε_{xp} , ε_{yp})

図11 方法 Z-1 / 設定モデル R7D における撮影方向の再現誤差 (ε_{ω} , ε_{ϕ})

の差) (ε_{xp} , ε_{yp}) および画像 L-1 の (ω , ϕ) の再現誤差 (設定値と推定値の差) (ε_{ω} , ε_{ϕ}) を、それぞれ図10 および図11に示す。図10より、解析モデル R7/R5 の D_T の大部分がこの (ε_{xp} , ε_{yp}) によるものであることがわかる。また、図11より、解析モデル R7/R5 では、非対称性の歪みを幾何歪みモデルの (x_p , y_p) と各画像の (ω , ϕ) が連動して画像座標の残差 2 乗和

を最小となるようにすることが、(ε_{xp} , ε_{yp}) の値が大きくなった原因と推測できる。

3.2.2 解析モデルの適否の認識可能性

前項で述べたように、適切な解析モデルを適用しないと、キャリブレーション結果として得られる幾何歪み関数の推定精度が低くなる (再現誤差 D_T が大きく

なる) ことがあることが判明したが、カメラキャリブレーション結果の評価に通常用いられている、基準点・標定点の画像座標の残差、基準点・検証点の地上座標の誤差、未知パラメータの推定値の標準偏差の3つの指標から、このことが認識できるかを、方法Z/設定モデルR7Dのシミュレーション結果について調べた。以下に、その結果と考察を示す。

(1) 基準点・標定点の画像座標の残差

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)である標定残差 V_P を考えた。

図12 方法Z-1/設定モデルR7Dにおける再現誤差 D_T と標定残差 V_P

$$v_{si} = (v_{xi}^2 + v_{yi}^2)^{1/2} \quad (8)$$

図12に D_T と V_P の散布図を示す。図12に示した解析結果の分布は、解析モデル R7D/R5D, 解析モデル R7/R5, 解析モデル R3D, 解析モデル R3の4つのグループに分かれ、各グループは互いに離れて分布している。 D_T の値が大きい R7/R5の V_P の値が、 D_T の値が小さい R3D の V_P の値より小さいため、この V_P の値から幾何歪み関数の推定精度を予測すること、つまり解析モデルの適否を認識することが難しいと言える。

(2) 基準点・検証点の地上座標の誤差

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検証点 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_{xvi}, r_{zi} の2乗平均の平方根である3次元計測誤差 E_{xy}, E_z を考えた。

$$\begin{cases} r_{xvi} = \frac{(e_{xi}^2 + e_{yi}^2)^{1/2}}{H - Z_i} \\ r_{zi} = \frac{e_{zi}}{H - Z_i} \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 Z_i は検証点 i の Z 座標、 H はキャリブレーションに使用した画像の撮影地点の Z 座標の平均値を表す。なお、検証点は、256点の3次元基準点のうち、解析に使用したサブセット64点以外の192点のうち、複数の画像に撮影されている基準点である。

図13、図14に D_T と E_{xy}, E_z の散布図を示す。 E_{xy}, E_z についても、 V_P とほぼ同様の状況であり、解析結果の分布は、一部で分布が重なってはいるが、解析モデル R7D/R5D, 解析モデル R7/R5, 解析モデル R3D, 解析モデル R3の4つのグループに分かれている。 D_T の値が大きい R7/R5の E_{xy}, E_z の値が、 D_T の値が小さい R3D の E_{xy}, E_z の値より小さい場合があるため、 E_{xy}, E_z の値から幾何歪み関数の推定精度を予測すること、つまり解析モデルの適否を認識することが難しい場合があることがわかる。

(3) 未知パラメータの推定値の標準偏差

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未知パラメータの推定値の標準偏差の中で、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) の推定値の標準偏差 $\sigma_c, (\sigma_{xp}, \sigma_{yp})$ を対象

図13 方法Z-1/設定モデルR7Dにおける再現誤差 D_T と3次元計測誤差 E_{XY}

図14 方法Z-1/設定モデルR7Dにおける再現誤差 D_T と3次元計測誤差 E_Z

とすることにした。ただし、主点位置のずれについては、推定値の標準偏差 (σ_{xp} , σ_{yp}) そのものでなく、以下の式(10)で計算されるその絶対値 σ_p を検討対象とした。

$$\sigma_p = (\sigma_{xp}^2 + \sigma_{yp}^2)^{1/2} \quad (10)$$

図15, 図16に D_T と σ_c , σ_p の散布図を示す。 V_p とほぼ同様に、解析結果の分布は、解析モデル R7D/R5D, 解析モデル R7/R5, 解析モデル R3D, 解析モデル R3の4つのグループに分かれ、各グループは互いに離れて分布している。松岡らの報告(2004)では、 σ_c , σ_p の値がカメラキャリブレーション結果を評価する指標になり得るとされていたが、図15, 図

16の結果が示すように、 D_T と σ_c , あるいは D_T と σ_p で、グループごとの値の大小関係が逆転する例があり、それに反する結果となった。さらに、R7, R5, R3の主点の位置のずれについては、図16に示した推定値の標準偏差 σ_p と図10に示した再現誤差(設定値と推定値の差) (ε_{xp} , ε_{yp}) が大きく異なっており、 σ_p から幾何歪み関数の推定精度を予測すること、つまり解析モデルの適否を認識することは不可能であると言える。

これらの結果より、カメラキャリブレーション結果の評価に通常用いられている指標である、基準点・標定点の画像座標の残差、基準点・検証点の地上座標の誤差、未知パラメータの推定値の標準偏差から、幾何

図15 方法Z-1/設定モデルR7Dにおける再現誤差 D_r と画面距離の推定値の標準偏差 σ_c

図16 方法Z-1/設定モデルR7Dにおける再現誤差 D_r と主点位置の推定値の標準偏差 σ_p

歪み関数の推定精度を予測すること、つまり解析モデルの適否を認識することが不可能な場合があることが確認された。

4. 提案する未知パラメータの選択方法

3. で述べた数値シミュレーションの結果より、式(1)で表される幾何歪みモデルに対しては、キャリブレーションで適用する幾何歪みモデルの未知パラメータの選択方法として、以下の2つの方法が適切であると考えられる。

第1の方法は、キャリブレーションで適用する幾何歪みモデルとして、すべての項を未知パラメータとするモデルR7Dを採用する方法である。数値シミュレー

ションでは、すべての項を未知パラメータとした場合においても、特に不都合が発生しなかったことや、現在の計算機の能力を考慮するならば、また必要に応じて計算アルゴリズムを工夫するならば、幾何歪みモデルへの項の追加による計算コストの増加は問題とならないと考えられることより、非対称性の歪みを表す項や放射方向歪曲収差を表す項の放射方向距離 r の7次項あるいは5次項を未知パラメータから除外する積極的理由は見出せない。

第2の方法は、すべての項を未知パラメータとするモデルR7Dの他に、一部の項を省略したモデルR7, R5D, R5, R3D, R3などを適用した解析を行い、得られた幾何歪み分布の差を比較し、モデルR7Dとの差が許容範囲内にあるモデルを採択する方法である。数値

表 9 PhotoModeler Pro 5 を用いた実験結果

(a) CAMELIA E-10

CAMELIA E-10		モデル R7D	モデル R7	モデル R5D	モデル R5	モデル R3D	モデル R3
画面距離	c (mm)	9.182	9.182	9.186	9.185	9.164	9.164
放射方向 レンズ歪み	k_1 (mm^{-2})	2.261×10^{-3}	2.247×10^{-3}	2.389×10^{-3}	2.374×10^{-3}	1.956×10^{-3}	1.941×10^{-3}
	k_2 (mm^{-4})	-7.935×10^{-6}	-7.976×10^{-6}	-2.024×10^{-5}	-2.023×10^{-5}		
	k_3 (mm^{-6})	-3.422×10^{-7}	-3.407×10^{-7}				
非対称性 レンズ歪み	p_1 (mm^{-1})	8.515×10^{-5}		8.496×10^{-5}		9.032×10^{-5}	
	p_2 (mm^{-1})	3.337×10^{-5}		3.356×10^{-5}		2.738×10^{-5}	
主点位置 のずれ	x_p (画素)	-19.15	-12.99	-19.18	-13.01	-19.45	-12.73
	y_p (ライン)	-22.78	-25.08	-22.76	-25.07	-22.53	-24.41
幾何歪みの 分布の差	D_T (画素)	<基準>	7.11	0.16	7.08	1.55	7.28

(b) PowerShot G2

PowerShot G2		モデル R7D	モデル R7	モデル R5D	モデル R5	モデル R3D	モデル R3
画面距離	c (mm)	7.193	7.191	7.195	7.193	7.174	7.171
放射方向 レンズ歪み	k_1 (mm^{-2})	3.379×10^{-3}	3.459×10^{-3}	3.540×10^{-3}	3.607×10^{-3}	2.745×10^{-3}	2.804×10^{-3}
	k_2 (mm^{-4})	-3.715×10^{-5}	-3.970×10^{-5}	-6.409×10^{-5}	-6.477×10^{-5}		
	k_3 (mm^{-6})	-1.221×10^{-6}	-1.154×10^{-7}				
非対称性 レンズ歪み	p_1 (mm^{-1})	1.252×10^{-4}		1.255×10^{-4}		9.659×10^{-5}	
	p_2 (mm^{-1})	3.592×10^{-4}		3.587×10^{-4}		3.470×10^{-4}	
主点位置 のずれ	x_p (画素)	-16.86	-10.01	-16.95	-10.07	-17.18	-11.68
	y_p (ライン)	22.52	3.42	22.52	3.44	23.17	4.30
幾何歪みの 分布の差	D_T (画素)	<基準>	21.76	0.21	21.72	2.73	20.66

シミュレーションでは、解析モデル R7D と R5D の幾何歪み分布の差は、E-10, G2 ともに、どの設定モデルに対しても十分小さいため、モデル R7D の代わりモデル R5D を採択することも妥当であると言える。

第 2 の方法に関して、PhotoModeler Pro 5 を用いたカメラキャリブレーションの実験を行った。実験では、今回の数値シミュレーションで想定したカメラと同等のカメラに対して、6 種類の幾何歪みモデル R7D, R7, R5D, R5, R3D, R3 について、同一の画像の組を用いて解析を行った。表 9 に、求められた幾何歪みモデル R7D, R7, R5D, R5, R3D, R3 の各パラメータの値と、モデル R7D を基準とした場合の幾何歪み分布の差を表す指標 D_T (式(4)) の値を示す。2 台のカメラの解析結果は、絶対値は異なっているが、適用する幾何歪みモデルの違いによる傾向は同一と言えるものである。幾何歪み分布の差を表す指標 D_T の値より、モデル R7D と非対称性歪みを考慮しないモデル R7, R5, R3 とでは、幾何歪み分布が大きく異なってい

ることがわかる。このことより、非対称性歪みの存在が予想され、モデル R7, R5, R3 では、幾何歪み分布を高い精度で推定することが難しいことが推測できる。また、モデル R7D とモデル R5D の差は小さく、放射方向歪曲収差を表す項の r の 7 次項の影響は小さいことが予想され、モデル R5D を採択することは十分合理的であると判断できる。

5. まとめ

今回の数値シミュレーションは、想定したカメラが 2 機種だけであり、現在よく用いられている幾何歪みモデル (3.1.4 で示した式(1)) に限定した解析ではあるが、この数値シミュレーションの結果より、カメラキャリブレーションにおける幾何歪みモデルの未知パラメータの選択に関して、以下のような考察が得られた。

レンズの非対称性の歪みが存在しているカメラのキャリブレーションにおいて、たとい非対称性の歪み

の大きさが小さくても、非対称性の歪みを表す項が含まれていないモデルを適用して解析を行うと、得られた幾何歪み分布の推定精度が低くなることもあり得ることがわかった。また、この原因が主点位置のずれの推定精度が低下することによることも判明した。

また、カメラキャリブレーション結果の評価指標として通常用いられている、基準点・標定点の画像座標の残差、基準点・検証点の地上座標の誤差、未知パラメータの推定値の標準偏差から、幾何歪み関数の推定精度を予測すること、つまり解析モデルの適否を認識することが不可能な場合があることも確認された。

式(1)で表される幾何歪みモデルに対しては、キャリブレーションで適用する幾何歪みモデルの未知パラメータの選択方法として、次の2つの方法が適切であると考えられる。1つは、キャリブレーションで適用する幾何歪みモデルとして、すべての項を未知パラメータとするモデルR7Dを採用する方法である。もう1つは、すべての項を未知パラメータとするモデルR7Dの他に、一部の項を省略したモデルR7, R5D, R5, R3D, R3などを適用した解析を行い、得られた幾何歪み分布の差を比較し、モデルR7Dとの差が許容範囲内にあるモデルを採択する方法である。

(受付日2004.7.29, 受理日2005.1.14)

参考文献

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.
那須 充, 1980. 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.
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, 2004. 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, 写真測量とリモートセンシング, vol. 42, no. 6, pp.19-32.
村井俊治, 松岡龍治, 奥田 勉, 1984. セルフキャリブレーション付きバンドル法の精度比較, 写真測量とリモートセンシング, vol. 23, no. 2, pp.4-11.
EOS Systems Inc., 2003. *PhotoModeler Pro 5 User Manual*.
Fraser, C.S., 2001. "Photogrammetric Camera Component Calibration," *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*, A. Gruen and T.S. Huang Eds., Springer-Verlag, pp.95-121.
Fryer, J.G., 1996. "Camera Calibration," *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, K.B. Atkinson Ed., Whittler Publishing, pp.156-179.
Fryer, J.G. and Brown, D.C., 1986. "Lens Distortion for Close-range Photogrammetry", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, no. 1, pp.51-58.
Matsuoka, R., Fukue, K., Cho, K., Shimoda, H. and Matsumae, Y., 2003. "A New Calibration System of a Non-Metric Digital Camera," *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, vol. I, pp.130-137.
Noma, T., Otani, H., Ito, T., Yamada, M. and Kochi, N., 2002. "New System of Digital Camera Calibration, DC-1000," *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, pp.54-59.