3D デジタルカメラ FinePix REAL 3D W1のキャリブレーション

Calibration of the 3D Digital Camera “FinePix REAL 3D W1”

松岡 龍治*・高橋 元気*・阿曾沼和義*

Ryuji MATSUOKA, Genki TAKAHASHI and Kazuyoshi ASONUMA

Abstract : The 3D digital camera FinePix REAL 3D W1, which was designed to take a pair of stereo images for stereo viewing, was released by FUJIFILM Cooperation in August 2009. The aim of our study is to evaluate camera calibration methods for measuring dimensions of an object on a sub-meter scale by using a pair of stereo images acquired by the camera without any controls. Three camera calibration methods were evaluated by estimation errors of length of line segments measured without any controls. The experiment results indicate that the best calibration method for the camera would be the method that ordinary camera calibration is first executed for each imaging unit in order to estimate its image distortion model, and then alignment between two imaging units is estimated by using two sets of the exterior orientation parameters of both imaging units obtained in the ordinary camera calibration executed previously.

1. はじめに

富士フイルム株式会社は、「FUJIFILM FinePix REAL 3D System」として、高画質で自然な3次元の映像が撮影できる3Dデジタルカメラ「FinePix REAL 3D W1」（図1参照）と自然な3D映像を専用メガネ不要で鑑賞できる3Dビューワー「FinePix REAL 3D V1」を2009年8月に発売を開始した。また、3D映像を写真プリントにする「3Dプリント」のサービスも同時に開始し、3D映像の入力から出力までの総合システムという形となっている。富士フイルム株式会社によると、FinePix REAL 3D W1は、3D映像をCCDで撮影でき、背面の液晶モニターを裸眼で鑑賞できるコンパクトデジタルカメラとしては世界最初の製品であるとのことである。

このカメラは、裸眼で鑑賞するステレオ画像を撮影することを目的としているため、ステレオ画像の撮影基線長が77mmと人間の眼基線より約20%長いだけで

ある。このため、精密なステレオ画像計測には向いていない。しかし、このカメラを用いることによりステレオ画像を非常に容易に取得することができるため、要求される計測精度によっては、基準点を必要としない簡易計測としての利用は見込めると考えられる。

そこで、基準点や基準となる寸法を提供する定規などを利用せずに、このカメラで撮影されたステレオ画像だけを用いて、大きさが数十cm程度の物体、例えば段ボール箱や家具などの寸法、あるいは数十cm程度離れた2点間の距離を計測することを想定して、このカメラ向けのキャリブレーション方法を検討するための実験を行った。さらにキャリブレーション結果に基づいてこのカメラの幾何学的特性を調査した。本論文はその報告である。

図1 FinePix REAL 3D W1

*国際航業株式会社

Kokusai Kogyo Co., Ltd.

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 49, NO.5, 2010

なお、本論文では、このカメラの利用目的として想定したように、撮影されたステレオ画像だけを用いて大きさが数十 cm 程度の物体の寸法や数十 cm 程度離れた 2 点間の距離を計測することを、簡易寸法計測と呼ぶことにする。

2. FinePix REAL 3D W1の概要

表 1 に FinePix REAL 3D W1 の 3D モード撮影時の主な仕様を示す。なお、このカメラの使用説明書(富士フイルム株式会社, 2009)では、輻輳点は、左右レンズの光軸が交わり、視差が無くなる点であると定義されている(図 2 参照)。また、撮影された 2 枚 1 組のステレオ画像は、マルチピクチャ(MP と略称される)

表 1 FinePix REAL 3D W1の 3D モード撮影時の主な仕様

有効画素数	1,000万画素
撮像素子	1/2.3型 CCD×2
焦点面上での画素サイズ	1.68 μ m×1.68 μ m
記録画素数	3,648×2,736
記録方式	マルチピクチャフォーマット準拠
レンズ	光学式 3 倍ズームレンズ×2 焦点距離：6.3mm－18.9mm (35mm フィルム換算： 約35mm－約105mm)
撮影ズーム倍率	光学・デジタルズーム併用， 最大約3.8倍 (35mm フィルム換算： 約39mm－約149mm)
輻輳点までの距離	[広角] 約 2 m, [望遠] 約6.5m

図 2 輻輳点までの距離・基線長・輻輳角

フォーマットに準拠した 1 つの「立体視用画像」ファイルとして記録される。

MP フォーマットは複数の「個別画像」と呼ばれる静止画像データを同一ファイルに記録するためのフォーマットで、「立体視用画像」に限らず、「パノラマ画像」、「マルチアングル画像」などを記録できるように規格が制定されている(カメラ映像機器工業会標準化委員会, 2009A)。MP フォーマットの仕様によれば、「立体視用画像」は「基線長」と「輻輳角」で規定される 1 組 2 枚以上の画像である。ここで、「輻輳角」は、基準となる視点からの第 1 の視線と、もう 1 つの視点からの第 2 の視線を第 1 の視線を含む平面に対して垂直に投影した線が、交差する角度であると、そして「基線長」は、2 つの視点間の直線距離であると定義されている。図 2 では、視点、視線を写真測量で通常用いられている用語である投影中心、光軸にそれぞれ置き換えて表示している。また、MP フォーマット内の「個別画像」は、Exif が規定する JPEG 圧縮データの 1 組の SOI マーカ～EOI マーカに挟まれた領域に存在する静止画像データであって、APPn 内部のデータを除く静止画像データであると定義されている。

FinePix REAL 3D W1 でステレオ画像を撮影した場合、左右の撮像系のレンズの焦点距離は「個別画像」の「レンズ焦点距離」のフィールドに、「輻輳角」と「基線長」は「MP フォーマット付属情報」のそれぞれのフィールドに記録される。ただし、表 1 にも示したが、このカメラでステレオ画像を撮影するときには、常にデジタルズームが作動する。Exif 2.21 の規格(カメラ映像機器工業会標準化委員会, 2009B)には「デジタルズーム倍率」のタグは定義されているが、このカメラが記録する MP フォーマットファイルにはこのタグが存在しない。さらに、MP フォーマット、Exif ともに、デジタルズームを行った領域の位置を記録するタグが定義されていない。このため、一般ユーザは、このカメラで撮影されたステレオ画像を記録したファイルからデジタルズームに関する情報を取得することはできない。

したがって、このカメラで撮影したステレオ画像だけを用いて計測を行うには、通常のカメライメージングで求められるカメラの内部標定要素に加え、デジタルズームに関する情報(ズーム倍率とズームを行った領域の位置)を求める必要がある。

3. FinePix REAL 3D W1のカメラキャリブレーション

3.1 画像幾何モデル

本研究では、FinePix REAL 3D W1で撮影されたステレオ画像の幾何モデルを次のように設定した。

撮像系 m ($=L$ (左), R (右)) の投影中心の位置を (X_{0m}, Y_{0m}, Z_{0m}) , 回転角を $(\omega_m, \phi_m, \kappa_m)$ とすると, 点 $P(X, Y, Z)$ の写真座標 (x_m, y_m) は次式で表されるとした。

$$\begin{cases} x_m = -c_m \frac{U_m}{W_m} + \Delta x_m \\ y_m = -c_m \frac{V_m}{W_m} + \Delta y_m \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_m \\ V_m \\ W_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_m & -\sin \omega_m \\ 0 & \sin \omega_m & \cos \omega_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_m & 0 & \sin \phi_m \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_m & 0 & \cos \phi_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \kappa_m & -\sin \kappa_m & 0 \\ \sin \kappa_m & \cos \kappa_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_{0m} \\ Y - Y_{0m} \\ Z - Z_{0m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで, c_m は撮像系 m の画面距離であり, $(\Delta x_m, \Delta y_m)$ は (x_m, y_m) における画像歪みを表す。また, 画像歪み $(\Delta x_m, \Delta y_m)$ は次式で表されると仮定した。

$$\begin{cases} \Delta x_m = \Delta x_{Pm} + \Delta x_{Rm} + \Delta x_{Dm} \\ \Delta y_m = \Delta y_{Pm} + \Delta y_{Rm} + \Delta y_{Dm} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta x_{Rm} = \bar{x}_m (k_{1m} r_m^2 + k_{2m} r_m^4 + k_{3m} r_m^6) \\ \Delta y_{Rm} = \bar{y}_m (k_{1m} r_m^2 + k_{2m} r_m^4 + k_{3m} r_m^6) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta x_{Dm} = p_{1m} (r_m^2 + 2 \bar{x}_m^2) + 2 p_{2m} \bar{x}_m \bar{y}_m \\ \Delta y_{Dm} = 2 p_{1m} \bar{x}_m \bar{y}_m + p_{2m} (r_m^2 + 2 \bar{y}_m^2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} r_m^2 = \bar{x}_m^2 + \bar{y}_m^2 \\ \bar{x}_m = x_m - \Delta x_{Pm} \\ \bar{y}_m = y_m - \Delta y_{Pm} \end{cases} \quad (6)$$

ここで, $(\Delta x_{Pm}, \Delta y_{Pm})$ は主点位置のずれ, $(\Delta x_{Rm}, \Delta y_{Rm})$ はレンズの放射方向歪曲収差などによる放射方向の歪み, $(\Delta x_{Dm}, \Delta y_{Dm})$ 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。この幾何歪みを表す式(3)~(6)は近接写真測量で用いられる画像歪みの代表的なモデルの1つである (Luhmann, *et al.*,

2006)。

さらに, デジタルズームに関しては, 点 $P(X, Y, Z)$ の画像座標 (u_m, v_m) が次式で表されると仮定した。

$$\begin{cases} u_m = s_m (x_m - x_{0m}) + u_{0m} \\ v_m = s_m (y_m - y_{0m}) + v_{0m} \end{cases} \quad (7)$$

ここで, s_m はズーム倍率, (x_{0m}, y_{0m}) と (u_{0m}, v_{0m}) はそれぞれズーム領域の中心の写真座標と画像座標である。

左右の撮像系の配置に関しては, 相互標定でのモデル座標系の取り方 (日本写真測量学会・解析写真測量委員会, 1983) を参考にして, 以下の仮定を設けた。

$$\begin{bmatrix} X_{0L} & Y_{0L} & Z_{0L} \\ \omega_L & \phi_L & \kappa_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \phi_L & \kappa_L \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} X_{0R} & Y_{0R} & Z_{0R} \\ \omega_R & \phi_R & \kappa_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & 0 & 0 \\ \omega_R & \phi_R & \kappa_R \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで, B は基線長である。式(8)と式(9)の仮定に従えば, このカメラでは, $\kappa_L \ll 1$, $\omega_R \ll 1$, $\kappa_R \ll 1$ と考えられるため, 輻輳角 α は次式で近似できる。

$$\alpha = \phi_R - \phi_L \quad (10)$$

3.2 キャリブレーションで推定するパラメータ

ズーム倍率 s_m , ズーム領域の中心の写真座標 (x_{0m}, y_{0m}) と画像座標 (u_{0m}, v_{0m}) などのデジタルズームに関するパラメータを, 撮像系 m の画面距離 c_m , 主点位置のずれ $(\Delta x_{Pm}, \Delta y_{Pm})$, 放射方向の歪みを表す多項式の係数 (k_{1m}, k_{2m}, k_{3m}) , 非対称性の歪みを表す多項式の係数 (p_{1m}, p_{2m}) などの内部標定要素と区別して求めることは不可能である。そこで, キャリブレーションでは, デジタルズームの効果を加味した内部標定要素として, 撮像系 m の画面距離 $s_m c_m$, 主点位置のずれ $(s_m (\Delta x_{Pm} - x_{0m}) + u_{0m}, s_m (\Delta y_{Pm} - y_{0m}) + v_{0m})$, 放射方向の歪みを表す多項式の係数 $(s_m k_{1m}, s_m k_{2m}, s_m k_{3m})$, 非対称性の歪みを表す多項式の係数 $(s_m p_{1m}, s_m p_{2m})$ を推定する。

また, 左右の撮像系の配置に関するパラメータとして, 基線長 B , 左の撮像系の回転角 (ϕ_L, κ_L) , 右の撮像系の回転角 $(\omega_R, \phi_R, \kappa_R)$ をキャリブレーションで推定する。

3.3 検討対象としたキャリブレーション方法

本研究では、左右の撮像系の回転角の推定方法が異なる3種類のキャリブレーション方法を検討対象とした。左右の撮像系の回転角を、相互標定(relative orientation)により推定する方法R、通常のカメラキャリブレーション時に同時に求められる左右の撮像系の外部標定要素(exterior orientation parameters)から推定する方法E、複数(multiple)の撮像系の内部標定要素と同時に推定する方法Mの3種類である。なお、どの方法においても、非測定用カメラのキャリブレーションでよく行われているように、平面上に配置された多数の標定点を四方から収斂撮影した画像を用いる。以下に、3つのキャリブレーション方法におけるパラメータの推定手順を示す。

(A) 方法R

- (1) 通常のカメラキャリブレーションと同様に、左右の撮像系ごとに、デジタルズームの効果を加味した内部標定要素を推定する。
- (2) (1)のカメラキャリブレーションで同時に求められる左右の撮像系の投影中心の位置から基線長を求める。
- (3) (1)のカメラキャリブレーションで求められた内部標定要素の値を用いて相互標定を行い、左右の撮像系の回転角を推定する。

(B) 方法E

- (1) 通常のカメラキャリブレーションと同様に、左右の撮像系ごとに、デジタルズームの効果を加味した内部標定要素を推定する。
- (2) (1)のカメラキャリブレーションで同時に求められる左右の撮像系の外部標定要素を、式(8)と式(9)を満足するように回転と平行移動を行い、その結果から基線長と左右の撮像系の回転角を求める。

(C) 方法M

- (1) 左右の撮像系のデジタルズームの効果を加味した内部標定要素と、左右の撮像系の配置に関するパラメータを同時に推定する。パラメータの推定には、FinePix REAL 3D W1の画像幾何モデルに対応した専用のバンドル法のソフトウェアを利用する。

なお、方法Rの(1)と方法Eの(1)は同じ処理である。

3.4 キャリブレーション実験の概要

本研究のキャリブレーション実験で使用する画像

は、PhotoModeler Pro 5のカメラキャリブレーションにおける画像撮影(EOS Systems Inc., 2003)と同様の手順で撮影した。FinePix REAL 3D W1の電動ズームは10段階あり、撮影画像ファイルに記録される焦点距離(以下、記号で表す場合は f を用いる)の値は、6.3mm, 7.1mm, 8.0mm, 9.1mm, 10.3mm, 11.6mm, 13.1mm, 14.8mm, 16.7mm, 18.9mmである。この焦点距離ごとにキャリブレーションを行った。

キャリブレーションに用いた標定点シートは大小2種類で、どちらも10点×10点、合計100点の標定点が配置されている。 $f \leq 10.3\text{mm}$ の5種類の焦点距離に対しては標定点間隔が10cm×10cmの約1m四方の大きいシートを、 $f \geq 11.6\text{mm}$ の5種類の焦点距離に対しては標定点間隔が5cm×5cm間隔の約0.5m四方の小さいシートを用いた。

キャリブレーションは、図3に示すように、標定点シートを上下左右の4方向から、各方向においてカメラの光軸周りの回転角を 0° , $+90^\circ$, $+180^\circ$, -90° の4種類として、収斂撮影した画像を用いて行った。キャリブレーションに使用した画像は左右の撮像系とも4方向×4回転角でそれぞれ16枚となる。方法R、方法E、方法Mのすべての方法で、標定点の画像座標はすべて同じ値を用いた。そのため、方法Rと方法Eで求められる左右の撮像系のデジタルズームの効果を加味した内部標定要素は同一のものとなる。

方法Rにおける相互標定では、2枚1組のステレオペアのデータを個別に用いた16セットと、16組すべてのステレオペアのデータを用いた1セットの合計17セットの結果が得られた。以降、2枚1組のステレオ

図3 キャリブレーションに使用した画像の一例

ペアのデータを用いて得られた16セットの基線長と左右の撮像系の回転角の平均値、最大値、最小値、あるいはそれらの値を用いた計測結果を、それぞれ方法 R (平均), 方法 R (最大), 方法 R (最小) と表記し、16 組すべてのステレオペアのデータを用いて得られた基線長と左右の撮像系の回転角、あるいはその値を用いた計測結果を方法 R (全数) と表記する。

また、方法 E では、2 枚 1 組のステレオペアごとに求められた各撮像系の外部標定要素を、式(8)と式(9)を満足するように回転と平行移動を行い、その結果から求められる基線長と左右の撮像系の回転角が16セット得られた。方法 R と同様に、2 枚 1 組のステレオペアのデータを用いて得られた16セットの基線長と左右の撮像系の回転角の平均値、最大値、最小値、あるいはそれらの値を用いた計測結果を、それぞれ方法 E (平均), 方法 E (最大), 方法 E (最小) と表記する。

なお、方法 M では、1 セットの基線長と左右の撮像系の回転角の推定結果が得られた。

3.5 キャリブレーション方法の評価

キャリブレーション方法の評価は、想定した使用方法である簡易寸法計測に対応して、長さ10cm の線分の長さの計測精度で行った。

計測には、図 4 に示すように、約100cm の標尺を縦 3 本×横 3 本に組み合わせたものを撮影したステレオ画像を用いた。どの撮影画像においてもほぼ同じ画像縮尺となるように、焦点距離に応じて撮影距離を変化させた。撮影距離は、最も広角側の $f=6.3\text{mm}$ で約1.6 m、最も望遠側の $f=18.9\text{mm}$ で約 6 m であった。

図 4 計測に使用した画像の一例

各標尺上に10cm 間隔で測定点10点を設定し、その測定点を両端とする長さ10cm の線分 9 本の長さを計測した。1 組のステレオペア画像では、54本の線分の長さを計測することになる。各焦点距離について、縦の標尺の傾きが約24°のステレオペア画像を 2 組、約 36°のステレオペア画像を 2 組、合計 4 組のステレオペア画像を計測対象とした。4 組のステレオペア画像で合計216本の線分の長さが計測され、計測精度の評価はその RMS で行った。

なお、方法 R, 方法 E, 方法 M のどの方法でも、計測点の画像座標はすべて同じ値を用いた。

4. 結果と考察

キャリブレーションおよび線分の長さの計測において取得された MP フォーマットファイルに記録された基線長 B の値はすべて77mm であり、輻輳角 α の値はすべて2.2°であった。

4.1 線分の長さの計測結果とその考察

図 5 に216本の線分の長さの計測結果を示す。図 5 に示した計測結果では、方法 R (平均, 全数) の計測精度が他の方法の計測精度より低く、特に望遠側でかなり低い。このため、方法 R は簡易寸法計測を対象としたキャリブレーション方法としては適当でないと結論される。一方、方法 M の計測精度は、全般的には方法 E (平均) の計測精度とほぼ同程度であったが、 $f=13.1\text{mm}$ と $f=14.8\text{mm}$ では、方法 E (平均) の計測精度よりかなり低くなっている。この実験前には、方法 M が理論的にスマートな方法であるため、方法 E より

図 5 線分の長さの計測誤差

図6 画像上の位置の計測誤差を単位とした線分の長さの計測誤差

高い計測精度を予測していたが、今回の実験結果からは、簡易寸法計測を対象としたキャリブレーション方法としては方法Eが最も適当であるという結論が導かれた。

図5に示した計測精度、特に望遠側の計測精度は一般の近接写真測量の計測精度に比べるとかなり低い印象を与えるものである。そこで、画像座標の計測精度から誤差伝播の法則に従って計算される計測精度の期待値を求めてみた。求められた計測精度の期待値に基づき、線分の長さの計測精度を画像上の位置の計測誤差を単位として表現したのが図6である。図6に示した計測精度から、最も広角側 ($f=6.9\text{mm}$) の方法E (平均) を除けば、方法E (平均) および方法Mの計測精度は、画像座標を0.4画素以下の精度で計測した場合の計測精度と同程度であった。このことより、方法E (平均) および方法Mは簡易寸法計測を対象としたキャリブレーション方法として十分満足できるものであると考えられる。

4.2 キャリブレーション結果とその考察

3.1で述べた画像の幾何モデルにおけるパラメータの間には相関関係が認められるパラメータの組み合わせが存在するため、キャリブレーションで求められた個々のパラメータの値を議論することは、必ずしも適当ではない。しかし、キャリブレーション方法により計測精度が異なる原因を考えるため、また FinePix REAL 3D W1の幾何特性を調査するため、キャリブレーションで求められた個々のパラメータの値について考察を加えることにする。

4.2.1 内部標定要素

先に述べたように、内部標定要素に関しては、方法Rと方法Eでは同じ推定値が得られる。一方、4.1に示したように、方法Rと方法Eでは線分の長さの計測精度は大きく異なっている。これに対し、方法Eと方法Mでは線分の長さの計測精度に大きな違いはない。これらのことより、方法R/Eで得られる内部標定要素の推定値と方法Mで得られる内部標定要素の推定値の違いが簡易寸法計測の計測精度に直接大きな影響を与えることはないと推測される。

図7にはデジタルズームの効果を加味した画面距離 s_{mCm} を示し、図8にはズーム倍率として (s_{mCm}/f) を示す。図7、図8より、キャリブレーション方法の違いにより画面距離の推定値が大きく異なるということはないことがわかる。また、画面距離の推定値に関しては、キャリブレーション方法の違いより左右の撮像系の違いの方がやや大きいこともわかる。これらのことより、画面距離の推定精度が簡易寸法計測の計測精度に大きな影響を与えることはないと判断される。なお、図8に示したズーム倍率は、最も広角側の $f=6.3\text{mm}$ では約1.1と小さく、 $f=13.1\text{mm}$ までは焦点距離が長くなるに従って大きくなり、 $f \geq 13.1\text{mm}$ で

図7 画面距離の推定値

図8 デジタルズーム倍率の推定値

図9 主点位置の推定値

は約1.4と一定値になった。

次に、主点位置に関しては、デジタルズームを考慮して、次式(11)で計算される CCD 面上のずれ(Δu_{pm} , Δv_{pm})を求めた。図9に CCD の画素を単位として表示した主点位置のずれを示す。

$$\begin{cases} \Delta u_{pm} = \frac{f}{C_m} \{s_m(\Delta x_{pm} - x_{0m}) + u_{0m}\} \\ \Delta v_{pm} = \frac{f}{C_m} \{s_m(\Delta y_{pm} - y_{0m}) + v_{0m}\} \end{cases} \quad (11)$$

図9に示した焦点距離に応じた主点位置の水平方向の移動は、Burner (1995) や Fraser and Al-Ajlouni (2006) が示したズームレンズに関するキャリブレーション結果よりかなり大きなものである。焦点距離が長くなるに従って、左の撮像系の主点が右側に、右の撮像系の主点はこれとは逆に左側に移動すると推定される。このことより、このカメラでは、3D映像を鑑賞する際に適切な立体感を確保しようとして、焦点距離に応じて CCD 上でデジタルズームを行う領域を移動させていると推測される。また、方法 R/E で推定

された主点位置の移動が滑らかであるのに対し、方法 M で推定された主点位置の移動はかなりギクシャクしているのが特徴的である。これについては、次項で輻輳角の推定結果と合わせて考察する。

4.2.2 左右の撮像系の配置に関するパラメータ

キャリブレーションで推定された基線長を図10に示す。基線長に関しても、方法 R と方法 E では同じ推定値が得られる。図10に示すように、キャリブレーションで推定された値と MP フォーマットファイルに記録された値77mm との差は無視できるほど小さいものではなかった。しかし、図5に示した計測精度では、同じ基線長の推定値を用いている方法 R と方法 E との間に大きな計測精度の違いがあったことを考えると、図10に示した基線長の推定値と記録値77mm との無視できない差も、計測精度には直接大きな影響を与えていないと判断される。

次に、図11、図12に、それぞれ方法 R、方法 E で推定された左右の撮像系の回転角から、式(10)を用いて計

図10 基線長の推定値

図11 方法 R による輻輳角の推定値

図12 方法 E による輻輳角の推定値

算された輻輳角を示す。方法 R で推定された輻輳角は、すべて MP フォーマットファイルに記録された値 2.2° より大きかった。また、相互標定に用いるステレオペアのデータによって輻輳角の推定値が大きく変動するのも特徴的である。方法 E の推定値も、方法 R の推定値と同様に、すべて MP フォーマットファイルに記録された値 2.2° より大きかった。ただし、輻輳角の計算に用いるステレオペアのデータによる輻輳角の推定値の変動は、方法 R に比べてかなり小さくなっている。

表 1 に示したように、このカメラの仕様では、輻輳点までの距離は広角で約 2 m、望遠で約 6.5 m とされている。これは、輻輳角に換算すると、広角で約 2.2°、望遠で約 0.68° に相当する。これに対し、MP フォーマットファイルに記録された輻輳角の値は焦点距離によらず 2.2° であり、方法 R や方法 E で求められた輻輳角の値はすべて 2.2° 以上であった。

そこで、図 13 に示すように、左右の撮像系においてズーム領域の中心と投影中心を結ぶ直線 2 本が交わる角を交差角 β と定義し、この値を求めてみた。ここで、

図13 輻輳角・補正角・交差角

撮像系 m ($=L$ (左), R (右)) の主点位置の水平方向のずれ Δu_{pm} から次式(12)で計算される補正角 γ_m とカメラの補正角 γ を考えることにする。

$$\begin{cases} \gamma_m = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta p \Delta u_{pm}}{C_m}\right) \\ \gamma = \gamma_L + \gamma_R \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 Δp は焦点面上での水平方向の画素サイズである。

このとき、交差角 β は次式(13)で計算される。

$$\beta = \alpha - \gamma = \alpha - (\gamma_L + \gamma_R) \quad (13)$$

図 14、図 15、図 16 に、それぞれ方法 R (平均)、方法 E (平均)、方法 M によって求められた輻輳角 α 、補正角 γ 、交差角 β を示す。焦点距離による輻輳角の変動に関しては、方法 M の推定値は、方法 R (平均) や方法 E (平均) の推定値に比較してかなりギクシャクしたものとなっている。しかし、焦点距離による交差角の変動に関しては、方法 M の推定値も、方法 R (平均) や方法 E (平均) の推定値と同様に、かなり滑らかに

図14 方法 R (平均) による輻輳角・補正角・交差角の推定値

図15 方法 E (平均) による輻輳角・補正角・交差角の推定値

図16 方法 M による輻輳角・補正角・交差角の推定値

図17 交差角の推定値

なっている。これは、補正角の変動が輻輳角の変動を打ち消すことによるもので、図9に示したように、主点位置の水平方向の移動がギクシャクしていたことに対応している。

図17に、方法 R (平均)、方法 E (平均)、方法 M によって推定された交差角 β を示す。図17では、方法 E (平均) の推定値と方法 M の推定値がほとんど同じ値となっているのに対し、方法 R (平均) の推定値は他の方法の推定値と若干差がある。この交差角の差が、図6に示した簡易寸法計測の計測精度の差を生じさせる原因と推測される。

このカメラは撮影基線長が77mmと短いため、相互標定では、左右の撮像系の配置を精度よく推定することが難しく、そのことが方法 R による簡易寸法計測の計測精度の低下に結びついたと考えられる。基線長が短いことは、図9や図16に示したように、方法 M で推定された主点位置や輻輳角の値も不安定にした。しかし、一般に主点位置 Δx_{pm} と回転角 ϕ_m との間には相関関係が認められるため、図16や図17に示したように、方法 M で推定された交差角は方法 E (平均) で推定さ

れた交差角とほぼ同様に安定した値となり、簡易寸法計測の計測精度が満足できるものになったと考えられる。

なお、図17に示した交差角の推定値より、表1に示した「輻輳点までの距離」は、このカメラの使用説明書での定義である、左右の撮像系の光軸が交わる点(図13の点 P)までの距離とは異なり、左右の撮像系においてズーム領域の中心と投影中心を結ぶ直線2本が交わる点(図13の点 Q)までの距離に相当すると考えられる。

5. まとめ

今回行った実験の結果から、FinePix REAL 3D W1 で撮影されたステレオ画像を用いて大きさが数十 cm 程度の物体の寸法を計測することを想定した場合のキャリブレーション方法としては、以下の方法 E が最も適切な方法であると判断された。

- (1) まず、非測定用カメラのキャリブレーションでよく行われているように、平面上に配置された多数の標定点を四方から収斂撮影した画像を用いたキャリブレーションを行い、左右の撮像系ごとに、デジタルズームの効果を加味した内部標定要素として、撮像系 m の画面距離 $s_m c_m$ 、主点位置のずれ $(s_m(\Delta x_{pm} - x_{0m}) + u_{0m}, s_m(\Delta y_{pm} - y_{0m}) + v_{0m})$ 、放射方向の歪みを表す多項式の係数 $(s_m k_{1m}, s_m k_{2m}, s_m k_{3m})$ 、非対称性の歪みを表す多項式の係数 $(s_m p_{1m}, s_m p_{2m})$ を推定する。
- (2) 次に、(1)のキャリブレーションで同時に求められる各撮像系の外部標定要素を、式(8)と式(9)を満足するように回転と平行移動を行い、その結果から、左右の撮像系の配置に関するパラメータとして、基線長 B 、左の撮像系の回転角 (ϕ_L, κ_L) 、右の撮像系の回転角 $(\omega_R, \phi_R, \kappa_R)$ を計算する。 $B, (\phi_L, \kappa_L), (\omega_R, \phi_R, \kappa_R)$ は、キャリブレーションに用いたステレオ画像のペア数だけ求まるので、その平均値をこのカメラの基線長と左右の撮像系の回転角とする。

この方法 E で推定されたパラメータの値を用いた計測実験では、画面上の点の位置を0.4画素以下の精度で計測した場合の計測精度の期待値とほぼ同程度の計測精度が得られ、方法 E は十分有効なキャリブレーション方法であると考えられる。

これに対し、デジタルズームの効果を加味した内部標定要素を求めた後に、その値を用いて相互標定を行い、左右の撮像系の配置に関するパラメータを求める方法 R は、有効なキャリブレーション方法ではないという実験結果が得られた。また、デジタルズームの効果を加味した内部標定要素と左右の撮像系の配置に関するパラメータを同時に求める方法 M は、計測精度に関しては、方法 E とほぼ同程度であるとの実験結果が得られたが、推定されたパラメータのばらつきがやや目についた。

方法 R や方法 M のように、ステレオペア画像を同時に用いて左右の撮像系の配置に関するパラメータを推定する方法の実験結果がよくなかった理由は、このカメラの基線長が77mm と短く、それによりパラメータの推定結果が不安定になったことによるものと考えられる。

FinePix REAL 3D W1の撮影基線長は77mm と短いため、このカメラで撮影されたステレオ画像を用いた簡易寸法計測では、計測対象の画像上の位置を0.5画素程度の精度で計測できても、広角側で3～5%程度、望遠側で8～10%程度の計測誤差が見込まれ、一般の近接写真測量に比べるとかなり低い計測精度となることが判明した。そこで、このカメラで撮影されたステレオ画像を用いると簡便に物体の寸法や距離を計測できるという利点を生かし、この程度の低い計測精度でも満足できるような計測対象を今後各方面で探そうと考えている。

また、FinePix REAL 3D W1の他のカメラに対して

実験を行い、カメラの個体差についての検討も実施する予定である。

(受付日2010.7.9, 受理日2010.9.15)

参考文献

- カメラ映像機器工業会標準化委員会, 2009A. CIPA DC-007-2009 マルチピクチャフォーマット, カメラ映像機器工業会, 東京.
- カメラ映像機器工業会標準化委員会, 2009B. CIPA DC-008-2009 デジタルスチルカメラ用画像ファイルフォーマット規格 Exif 2.21 統合版, カメラ映像機器工業会, 東京.
- 日本写真測量学会・解析写真測量委員会, 1983. 解析写真測量, 日本写真測量学会, 東京, pp.14-16.
- 富士フイルム株式会社, 2009. FinePix REAL 3D W1 使用説明書, 東京.
- Burner, A.W., 1995. Zoom Lens Calibration for Wind Tunnel Measurement, *Videometrics IV*, SPIE 2598, Philadelphia, pp.19-33.
- EOS Systems Inc., 2003. *PhotoModeler Pro 5 User Manual*, Vancouver.
- Fraser, C.S., Al-Ajlouni, S., 2006. Zoom-dependent Camera Calibration in Digital Close-range Photogrammetry, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 72, no. 9, pp.1017-1026.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., 2006. *Close Range Photogrammetry*, Whittles Publishing, Caithness, pp.114-129.