トリプレット画像を用いたカメラキャリブレーション手法に関する研究

Camera Calibration for Digital Camera using Triplet Images

柳 秀治*・近津 博文**

Hideharu YANAGI and Hirofumi CHIKATSU

Abstract : According to appearance of low cost and high resolution consumer grade digital cameras with various functions, convenient 3D measurement using the digital cameras are enormously expected in various fields. However, there are still problems for efficient digital photogrammetry using the cameras. These problems include 3D measurement for ground control point, previous interior orientation procedures and restriction for taking images. These restrictions should be removed for ideal convenient photogrammetry using the digital cameras.

In order to resolve the above problems, efficient camera calibration method which does not need ground control points nor previous interior orientation procedures are proposed in this paper.

1. はじめに

民生用デジタルカメラの低価格化および高解像度化が進み、高解像度撮像素子を搭載した多種、多様な民生用デジタルカメラが発売され、手軽に高解像度画像を手に入れることが可能となった。このため、これまでに民生用デジタルカメラの実用化に関する多数の研究が報告されている（例えば、Habib and Morgan, 2003；Fraser and Hanley, 2004；Laebe and Foerster, 2004）。

しかし、民生用デジタルカメラを用いて写真測量を行なう場合、一般的には地上基準点を用いてカメラキャリブレーションを行なう必要があり、地上基準点設置に伴う測量は簡便な写真測量のボトルネックとなっている。いっぽう、多数の撮影点で取得された多視点画像に対してフリーネットワーク理論に基づく

キャリブレーション手法（Fraser, 1996）は地上基準点を利用しない方法であるが、各撮影点で多数の画像を撮影する必要がある、簡便な写真測量の実現のためには少ない枚数の写真で、かつ地上基準点測量を必要としないカメラキャリブレーション法が必要であると判断される。

このような背景から、地上基準点を必要としない写真測量用ソフトウェアが現在多く発売されているが、これらソフトウェアの多くは標定用シートや三次元座標が既知なテストターゲットを用いてカメラの内部標定要素を予め取得しておく必要がある。すなわち、予め求めておいた内部標定要素をその後の計測において繰り返し使用することになるが、我々はこのような場合にはカメラにもよるが計測精度が4倍程度低下するという知見を得ている（高橋・近津, 2010）。

したがって、民生用デジタルカメラによる写真測量の実現には、カメラキャリブレーションの簡略化と計測精度の維持という、相反する問題に直面することになるが、本研究ではこれらの課題に対してトリプレット画像を利用した簡便なカメラキャリブレーションソフト“3DiVision”を提案してきたが精度の改善が課題であった（近津ほか, 2003；江島ほか, 2006）。そこで、本研究では中央画像上でのエピポーララインの交点に対する条件式を制約条件としたキャリブレーション手

* 東京電機大学理工学部

School of Science and Engineering, Tokyo Denki University

**東京電機大学理工学部理工学科 建築・都市環境学系

Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Tokyo Denki University

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 50, NO. 3, 2011

法を提案し、民生用デジタルカメラ14機種を用いて提案手法の妥当性を検討する。

2. トリプレット画像によるカメラキャリブレーション

本研究におけるカメラキャリブレーションとは3箇所（左、中央、右）において撮影されたトリプレット画像に対して計測空間中の2点間の距離と共線条件式（式(1)）とを用いて、それぞれのカメラの外部標定要素および3つのカメラに共通な内部標定要素を同時に取得しようとするものである。なお、本研究ではカメラキャリブレーションの際にトリプレット画像上に共通な特徴点を擬似基準点と定めて使用するが、これらの擬似基準点は画像上で確認できれば良いもので、その三次元座標は既知である必要はない。また、本手法では擬似基準点の1点（ P_0 ）を原点と定め、X軸方向を規定する点を P_1 とし、計測空間中の2点間の距離は原点 P_0 と P_1 との距離とする。図1は本研究における撮影方法の概念を示したものであり、以下に詳細なキャリブレーション手順を示す。

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

ここに、 (X, Y, Z) ：擬似基準点の三次元座標、 (X_0, Y_0, Z_0) ：撮影点の三次元座標、 (x, y) ：擬似基準点の画像座標、 m_{ij} ：回転行列の要素

図1 撮影方法

図2 キャリブレーションの流れ

2.1 キャリブレーション手順

図2はキャリブレーション手順を示したものであるが、取得された擬似基準点の三次元座標と各カメラの内部・外部標定要素を初期値とし、これらの未知量を同時に調整するものであり、本研究で提案するカメラキャリブレーションにおける未知量は左、中央、右カメラに対する外部標定要素18個{位置 (X_{0L}, Y_{0L}, Z_{0L}) , (X_{0C}, Y_{0C}, Z_{0C}) , (X_{0R}, Y_{0R}, Z_{0R}) , 姿勢 $(\omega_{0L}, \kappa_{0L}, \varphi_{0L})$, $(\omega_{0C}, \kappa_{0C}, \varphi_{0C})$, $(\omega_{0R}, \kappa_{0R}, \varphi_{0R})$ }および3つのカメラに共通な内部標定要素7個{焦点距離 f , 主点の位置 x_0, y_0 , レンズ歪係数 K_1, K_2 , 画素座標から画像座標への変換係数 a, b }と擬似基準点 n 点に対する三次元座標 (X_i, Y_i, Z_i) の $3n$ 個、合計 $25+3n$ 個となるが、原点およびX軸を規定する擬似基準点を配置するため、これらの擬似基準点座標 $P_0(0, 0, 0)$, $P_1\{X_1(=D), 0, Z_1\}$ において、 Z_1 は既知量（例えば、点 P_1 は原点と同じ平面上の点とすると $Z_1=0$ ）とすると未知量は X_1 を除く5個減少し、合計 $25+3n-5$ 個となる。

いっぽう、これら未知量に対して3枚の画像に共通な擬似基準点より得られる共線条件式と距離に対する観測方程式が条件式となり、各未知量は距離の拘束の下に最小二乗法の原理にしたがって式(2)を最小とする値として算出されることになる。なお、この場合 $25+3n-5 < 6n+1$ より、7点以上の擬似基準点が必要となるが、本研究ではソフト開発を行なうに当たり擬似基準点数の影響を無視するために13点を擬似基準点とした。

$$H = [p_1(dx^2 + dy^2)] + p_2[dD^2] \Rightarrow \min \quad (2)$$

ここに、 $[\]$ ：総和記号、 dx, dy ：画像座標に対する補正量、 dD ：距離に対する補正量、 p_1, p_2 ：画像及び距離の測定値に対する重み（本研究では $p_1=p_2=1$ ）

なお、レンズ歪み補正量を放射方向5次多項式モデル(Δ_{rad})で表すとすると、 x, y 方向の補正量は次式で表すこととなる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\text{rad}} &= K_1 r^3 + K_2 r^5 \\ \Delta x_{\text{rad}} &= (\Delta_{\text{rad}}/r)x \\ \Delta y_{\text{rad}} &= (\Delta_{\text{rad}}/r)y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ 、 x, y ：補正前の像点の画像座標、 K_1, K_2 ：放射方向レンズ歪み係数

3. エピポーラ調整

図2に示したトリプレット画像によるカメラキャリブレーション手法(3DiVision)では2点間距離は縦または横に設置することは可能であるが、簡便性から距離の計測は1箇所のみであり、X軸方向に行なう場合が一般的であるため、Y軸方向の縮尺はX軸方向と比較して低い精度となる。また、縮尺を決定する要因の一つは焦点距離であり、EXIF情報から取得される焦点距離(公称値)を使用した場合でも上記の理由によりY、Z座標の初期値の精度は低いものとなる。したがって、3DiVisionにおける課題は擬似基準点の初期値の内、Y、Z座標の初期値の精度を如何に改善するか、言い換えれば如何にして質の高い擬似基準点座標が算出される焦点距離を与えるかという問題に帰着する。

そこで、本研究では図2の2における左右画像の相互標定の際に左・中央および中央・右のステレオペアの組み合わせについてそれぞれ相互標定を行なった後、左右画像における同じ擬似基準点に対するエピポーララインが中央画像の同一擬似基準点において交わるという拘束条件式を導入し、焦点距離の初期値を以下のように算出することとする。

すなわち、

$$\begin{aligned} q_1 &= a_{31,1} \cdot x_1 + a_{32,1} \cdot y_1 - a_{33,1} \cdot f \\ r_1 &= a_{21,1} \cdot x_1 + a_{22,1} \cdot y_1 - a_{23,1} \cdot f \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} q_4 &= a_{31,4} \cdot x_4 + a_{32,4} \cdot y_4 - a_{33,4} \cdot f \\ r_4 &= a_{21,4} \cdot x_4 + a_{22,4} \cdot y_4 - a_{23,4} \cdot f \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $a_{ij,1}$ ：左画像における回転パラメータ、 $a_{ij,2}$ ：右画像(中央画像)における回転パラメータ、 $a_{ij,3}$ ：左画像(中央画像)における回転パラメータ、 $a_{ij,4}$ ：右

像における回転パラメータ、 (x_1, y_1) ：左画像における擬似基準点の画像座標、 (x_4, y_4) ：右画像における擬似基準点の画像座標、 f ：焦点距離(公称値)

とすると、左画像から中央画像および右画像から中央画像に対する対するエピポーララインは式(6)となるから、

$$\begin{aligned} (q_1 \cdot a_{21,2} - r_1 \cdot a_{31,2})x + (q_1 \cdot a_{22,2} - r_1 \cdot a_{32,2})y \\ - (q_1 \cdot a_{23,2} - r_1 \cdot a_{33,2})f = 0 \\ (q_4 \cdot a_{21,3} - r_4 \cdot a_{31,3})x + (q_4 \cdot a_{22,3} - r_4 \cdot a_{32,3})y \\ - (q_4 \cdot a_{23,3} - r_4 \cdot a_{33,3})f = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

エピポーララインの交点に対する座標は次式となる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{(B_1 C_3 - B_3 C_1)}{(A_1 B_3 - A_3 B_1)} \\ y &= \frac{(C_1 A_3 - C_3 A_1)}{(A_1 B_3 - A_3 B_1)} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、

$$\begin{aligned} A_1 &= (q_1 \cdot a_{21,2} - r_1 \cdot a_{31,2}), \quad B_1 = (q_1 \cdot a_{22,2} - r_1 \cdot a_{32,2}), \\ C_1 &= -(q_1 \cdot a_{23,2} - r_1 \cdot a_{33,2})f \\ A_3 &= (q_4 \cdot a_{21,3} - r_4 \cdot a_{31,3}), \quad B_3 = (q_4 \cdot a_{22,3} - r_4 \cdot a_{32,3}), \\ C_3 &= -(q_4 \cdot a_{23,3} - r_4 \cdot a_{33,3})f \end{aligned}$$

そこで、

$$\begin{aligned} Q &= (A_1 B_3 - A_3 B_1), \quad R = (B_1 C_3 - B_3 C_1), \\ S &= (C_1 A_3 - C_3 A_1) \end{aligned} \quad (8)$$

とすると次式が得られる。

$$\begin{aligned} F &\equiv Qx - R = 0 \\ G &\equiv Qy - S = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ところで、3DiVisionにおけるレンズ歪みモデルは放射方向5次多項式モデル(5R)であるが、エピポーラ調整においてはすでに相互標定がされている画像の画像残差の精度を改善する必要上、接線歪みも考慮した5次放射方向歪み+接線方向歪みモデル(5RD)とする。したがって、5次放射方向歪みと接線方向歪みモデル(5RD)を考慮した場合、接線歪み補正量を Δx_{tan} 、 Δy_{tan} 、総補正量を $\Delta x(\Delta x_{\text{rad}} + \Delta x_{\text{tan}})$ 、 $\Delta y(\Delta y_{\text{rad}} + \Delta y_{\text{tan}})$ とするとレンズ歪み補正後の x, y 座標($\bar{x}, \bar{y}$)は、

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x + \Delta x \\ \bar{y} &= y + \Delta y \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 $\Delta x_{\text{tan}} = P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy$ 、 $\Delta y_{\text{tan}} = P_2(r^2$

$+2y^2)+2P_1xy$, $r=\sqrt{(x^2+y^2)}$, x, y : 補正前の画像座標, P_1, P_2 : 接線方向歪み係数
また、画像座標と画面座標との関係式に次式を適用すると (Faugeras & Toscani, 1987),

$$\begin{aligned} u &= u_0 + ax + by \\ v &= v_0 + cy \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 (u, v) : 画面座標(pixel), (u_0, v_0) : 主点位置(pixel), (x, y) : 画像座標(mm), a, c : スケールファクタ, b : セン断係数
であるから各交点に対する式(9)は次式となる。

$$\begin{aligned} F &\equiv (u_i - u_0) \cdot Q_i - \frac{1}{(1 + K_1 r_i^2 + K_2 r_i^4 + 2P_1 x + 2P_2 y)} \\ &\quad \cdot \{(aR_i + bS_i) - r^2(aP_1 + bP_2)\} = 0 \\ G &\equiv (v_i - v_0) \cdot Q_i - \frac{1}{(1 + K_1 r_i^2 + K_2 r_i^4 + 2P_1 x + 2P_2 y)} \\ &\quad \cdot c(S_i - r^2 P_2) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)における未知量を焦点距離(f), 放射方向レンズ歪み(K_1, K_2), 接線方向レンズ歪み(P_1, P_2)とし, 式(12)をテラ展開し最小二乗法の原理にしたがって算出される最小解を用いて算出される交点座標と中央画像上の画像座標との残差の2乗和と未知量に対する内的精度の2乗和とを用いて4.1で述べる手法により焦点距離の初期値を更新する。

4. 精度検証実験

4.1 実験概要

ここでは、エピソード調整を導入した3DiVisionの有効性を検討するために、検証用テストターゲット(H: 480mm, W: 640mm, D: 20mm)に対して表1に示す民生用デジタルカメラを使用して精度検証実験を行なった。撮影は各カメラに対する画像縮尺がほぼ一定となるように撮影距離(カメラからターゲット間の距離)を調整し、左右画像に対する基線比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、ターゲットの大きさ(直径)は20mm, ターゲット間隔は40mm, 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 ± 0.05 mmである。精度検証は図3中の白丸で印した13点を擬似基準点としてカメラキャリブレーションを実施した後、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り、本研究での結果は5回測定の実験値である。

表1 カメラ諸元

Maker 機種名	SONY CyberShot DSC-T10	SONY CyberShot DSC-N1	Nikon COOLPIX S500	Nikon COOLPIX S700	Nikon COOLPIX S710	Canon IXY DIGITAL 1000	Canon IXY DIGITAL 2000 IS
画素数(Megapixel)	7.2	8.1	7.1	12.1	14.5	10	12.1
撮像素子	1/2.5"CCD	1/1.8"CCD	1/2.5"CCD	1/1.72"CCD	1/1.72"CCD	1/1.8"CCD	1/1.7"CCD
解像度	3072×2304	3264×2448	3072×2304	4000×3000	4352×3264	3648×2736	4000×3000
焦点距離(mm)	6.33	7.9	5.7	7.9	6.0	7.7	7.7
焦点距離(mm) (35mm 換算)	38	38	35	37	28	37	36
撮影距離(mm)	893	866	801	851	665	876	876

Maker 機種名	Panasonic LUMIX DMC-FX9	OLYMPUS μ 810	CASIO EXLIM EX-Z1000	Kodak EasyShare V1003	PENTAX Optio A40	FUJIFILM FinePix F50fd	Canon EOS 50D*
画素数(Megapixel)	6	8	10.1	10	12	12	15
撮像素子	1/2.5"CCD	1/1.8"CCD	1/1.8"CCD	1/1.8"CCD	1/1.7"CCD	1/1.6"CCD	22.3×14.9mm
解像度	2816×2112	3264×2448	3648×2736	3648×2736	4000×3000	4000×3000	4752×3168
焦点距離(mm)	5.8	7.4	7.9	7.5	7.9	8.0	24
焦点距離(mm) (35mm 換算)	35	35	38	36	37	35	38.4
撮影距離(mm)	845	832	875	827	865	829	1086

*Lens : Canon EF 24-105mm F4L IS USM

4.2 焦点距離の更新

3DiVision においては擬似基準点の三次元座標の初期値は相互標定の結果より得られる相似モデルに対して 2 点間の距離を用いた相似変換により算出している。したがって、擬似基準点の三次元座標の初期値は焦点距離の値に影響されることとなる。しかしながら、民生用デジタルカメラの場合には EXIF 情報から取得される焦点距離の公称値は概略値であるため、3DiVision における精度改善のためには高品位な焦点距離の初期値を知ることが必要となる。

そこで、本研究では EXIF 情報より得られる焦点距離の前後 0.5mm の区間において、画像座標と中央画像上の画像座標との残差の 2 乗和を各未知量に対する内の精度の 2 乗和の平方で正規化したものの重心位置に対応する値を焦点距離の初期値(公称値)に代わる値とする。

なお、ここでの 2 点間距離は図 3 に示すテストターゲットにおいて下段の左右の 2 点間距離とし、その値

図 3 テストターゲット

表 2 エピポーラ調整前後における画像残差 (f=7.9mm)

調整前画像残差		調整後画像残差	
x (pixel)	y (pixel)	x (pixel)	y (pixel)
-30.305	0.038	-18.560	0.079
15.110	0.370	15.203	0.315
3.144	-0.122	-3.969	-0.147
12.684	-0.370	7.951	-0.348
16.437	0.340	18.295	0.356
3.473	-0.056	2.275	-0.036
-12.943	0.001	-9.698	0.028
-2.505	0.118	1.192	0.044
5.333	-0.088	4.285	-0.022
32.188	0.158	-3.730	-0.160
-27.603	-0.398	-7.959	-0.159
-31.542	-0.308	-7.387	-0.038
16.316	0.323	2.108	0.097
精度	69.727	精度	35.285

は 560mm である。

表 2 は民生用デジタルカメラ (N1) の第 1 セット目のデータに対する焦点距離 7.9mm (公称値) におけるエピポーラ調整前後の擬似基準点 13 点に対する画像残差および精度 (画像残差の 2 乗和の平方) を示したものである。表 2 よりエピポーラ調整が有効に機能していることが確認される。なお、表 2 において y 座標の画像残差が小さい理由はすでに相互標定が行なわれているためである。

いっぽう、表 3 は焦点距離の公称値 ($f=7.9\text{mm}$) に代わり更新焦点距離 ($f=8.25\text{mm}$) を初期値として各擬似基準点 X, Y, Z に対する外的精度と以下の標準精度で擬似基準点に対する精度を検討したものである。なお、外的精度とは各擬似基準点 X, Y, Z に対する RMS 誤差であり、ここでの標準精度とは各擬似基準点 X, Y, Z に対する内的精度 (Beyer, 1991) をそれぞれ $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$ として次式より算出される値である。

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sum \hat{\sigma}_x^2 + \sum \hat{\sigma}_y^2 + \sum \hat{\sigma}_z^2} \quad (13)$$

ここに、 $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$: 各擬似基準点 X, Y, Z に対する内的精度

表 3 より僅かであるが擬似基準点の精度の向上が確認される。したがって、提案手法であるエピポーラ調整を行なうことにより 3DiVision による多少の精度改善が期待される。

4.3 精度検証結果

ここでは提案手法の妥当性を検討する。図 4 は各カメラに対する計測精度を示したものである。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)。

$$\frac{\sigma_c}{D} = \frac{\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)/3}}{\sqrt{DX^2 + DY^2 + DZ^2}} \quad (14)$$

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

図 4 より幾つかの機種においては多少のエピポーラ調整の効果が認められるが、多くの機種においてはエ

表3 擬似基準点の精度 (N1)

三次元座標(最確値)			三次元座標(公称値, f=7.9mm)			三次元座標(更新値, f=8.25mm)		
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0	0	0	-0.536	-0.116	-0.627	-0.515	-0.101	-0.581
560	0	0	560.019	0.271	1.124	560.054	0.243	1.054
0	400	0	-0.888	401.700	15.659	-1.232	401.218	15.631
280	0	20	280.976	-4.856	14.236	280.873	-5.050	13.977
0	200	0	-2.855	200.294	6.330	-2.985	199.968	6.382
280	200	20	281.527	198.621	22.592	281.371	198.352	22.310
560	200	0	563.190	199.133	8.408	563.289	198.945	8.322
280	400	20	281.919	403.025	31.341	281.710	402.883	31.030
560	400	0	561.984	398.864	17.768	562.193	398.711	17.594
160	120	0	158.248	118.223	-0.606	158.213	118.095	-0.100
400	120	0	403.701	118.027	0.299	403.546	117.926	0.742
160	280	0	158.369	281.930	6.195	158.244	281.507	6.661
400	280	0	404.225	281.120	7.037	404.075	280.792	7.442
外的精度 (mm)/内的精度 (mm)			32.397/4.698			32.371/4.248

図4 計測精度

ピポーラ調整の効果は認められなかった。この理由としては、最適な焦点距離の初期値が公称値の前後0.5 mmの区間に存在しないこと、および焦点距離の値が小さいため焦点距離の更新が擬似基準点座標に大きく反映されなかったためであると推測される。この推測については次項以降においてさらに考察する。また、F50fdの精度が低い理由としては正方形素子センサーを用いていないためと推測される。

5. 3DiVisionの応用

本研究で提案したエビポーラ調整付き3DiVisionは高精度写真測量を可能とするものではないが、簡便の写真測量においては有効な手法であると期待される。そこで、3DiVisionによる簡便の写真測量を検証するため、ギリシャ古代都市フィガリアにおける城壁に対してトリプレット撮影を行なった。図5は計測対象の

城壁であり、中央画像の左右に三脚に取り付けられた円形ターゲットが確認されるが、この2点間距離が計測された。図中のその他の円形ターゲットは検証用ターゲットであり、これらのターゲットの三次元座標はトータルステーションで計測されているが、距離計測用ターゲットの三次元座標は計測されていないため座標に対する精度検証を行なうことは不可能である。そこで、ここでは3DiVisionによるキャリブレーション後に算出される各検証点の座標を用いて算出される各検証点間の距離とトータルステーションで計測された三次元座標をから算出される距離との比較を行なうこととし、図6に示す3測線に対する結果が表4である。なお、ここで使用したカメラはEOS 50D(1500万画素, f=10mm)であり、擬似基準点数は17点、撮影距離は凡そ6.9mである。また、2点間距離(10.1672 m)の計測はレーザー距離計(Leica, DISTO™ D3, ±1.0 mm)により行なった。

図6はオルソ画像であり、図7はCannyオペレータにより抽出したエッジ画像である。表4よりまず気付くことは使用カメラの焦点距離の値(f=10mm)は小さいにもかかわらずエビポーラ調整の効果が認められることである。このことは焦点距離の値が小さくても撮影距離が長ければエビポーラ調整の効果があるものと推測される。

いっぽう、通常文化財の分野では1/50あるいは1/20程度の平面図が一般的であるが、図面上0.3mm程度の精度を考えた場合3DiVisionの結果は1/50の精度

を満たしていることが確認されるが、エピポーラ調整を行なうことにより1/20の精度もほぼ満足されることが確認される。

また、図7に示したエッジ図は素図として利用されることを考慮すると3DiVisionは簡便の写真測量の分野において十分有効な手法であると期待される。

図5 計測対象

図6 オルソ画像

図7 エッジ画像

表4 計測結果

計測区間	実測値 (mm) TS	差(実測値-3DiVision計測値)(mm)	
		エピポーラ 調整なし	エピポーラ 調整あり
		f=10mm	f=9.83mm
1	8456.7	-9.5	-7.1
2	7217.7	10.9	-3.2
3	5125.0	-4.6	1.9

6. 長焦点レンズを用いた検証

前節において焦点距離が短い場合にはエピポーラ調整の効果が小さいこと、撮影距離が長くなればエピポーラ調整の効果が大きであると推定されたが、ここではマクロレンズ (Canon, EF100mm f/2.8 Macro USM) を用いてこの推定を検証する。なお、使用カメラは前節と同じ EOS 50D である。

図8はマクロレンズ用に使用する小型テストターゲット (H:100mm, W:100mm) であり、ターゲットの大きさ(直径)は10mm、ターゲット間隔は20mm、ターゲット中央下段2点 (図中四角で囲まれたターゲット) に対する高さは10mm である。各円形ターゲットの加工精度は図3と同様に±0.05mm であり、ここでの擬似基準点数は図中の白丸と四角で印した8点とし、擬似基準点以外の17点を検証点とする。また、2点間距離は図8において下段の左右間の距離とし、その値は80mm である。

なお、3DiVisionにおけるレンズ歪みモデルは放射方向5次多項式モデルを採用しているが、マクロレンズを用いる場合、放射方向3次多項式モデルで十分な計測精度が得られることが報告されているため (柳・近津, 2009), ここでの検証におけるレンズ歪みモデルは放射方向3次多項式モデルを採用する。また、エピポーラ調整における未知量は焦点距離 f と放射方向歪み K_1 であり、探索区間は焦点距離100mm の前後10 mm とする。

図8 マクロレンズ用テストターゲット

6.1 精度評価

表5は第1セット目のデータに対する焦点距離100.0mm（公称値）におけるエピポーラ調整前後の擬似基準点に対する画像残差および精度（画像残差の2乗和の平方）を示したものである。

表5より、エピポーラ調整がマクロレンズの場合にも有効に機能していることが確認される。

次に、民生用デジタルカメラの場合と同様に焦点距離の違いによる擬似基準点の三次元座標に対する初期値の検証を行なう。

表6は公称値を使用した場合と更新後の焦点距離を使用した場合に対する擬似基準点座標と精度である。表6よりマクロレンズの場合には擬似基準点座標の精度、特にY座標に対する精度が良好に改善されていることが確認される。この理由としてはマクロレンズ（f=100mm）の焦点距離は民生用デジタルカメラと比較してもかなり大きな値であるため、焦点距離の値の変動が擬似基準点に与える影響は大きく、焦点距離の更新が擬似基準点座標に効率的に反映されたためと考

表5 画像残差（f=100mm）

調整前画像残差		調整後画像残差	
x(pixel)	y(pixel)	x(pixel)	y(pixel)
26.170	2.482	-1.829	0.003
-34.026	2.347	1.914	-0.018
-0.456	1.718	-0.519	-0.025
4.099	-0.624	4.092	-0.042
-2.661	-0.569	-3.842	0.029
1.772	-3.434	-6.522	0.028
-3.817	-3.459	0.752	0.016
0.919	1.732	0.079	-0.006
精度	43.902(pixel)	精度	9.050(pixel)

表6 擬似基準点の精度（マクロレンズ：EOS50D）

三次元座標(最確値)			三次元座標(公称値, f=100mm)			三次元座標(更新値, f=109.258mm)		
X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
0	0	0	-0.041	-0.001	-0.017	-0.042	-0.001	-0.016
80	0	0	80.040	0.001	0.025	80.041	0.001	0.023
0	80	0	0.017	82.411	2.206	0.022	80.776	2.249
20	0	10	19.884	-0.117	11.411	19.842	-0.206	10.473
60	0	10	60.032	-0.123	11.596	60.079	-0.213	10.643
0	40	0	-0.022	41.215	1.094	-0.020	40.395	1.116
80	40	0	80.081	41.216	1.156	80.092	40.395	1.174
80	80	0	80.110	82.394	2.287	80.131	80.758	2.325
外的精度(mm)/内的精度(mm)			5.633/0.574			3.949/0.546

図9 計測精度（マクロレンズ：EOS50D）

えられる。

特に、3DiVisionでは擬似基準点座標の算出においてY座標の精度改善が課題であったが、表6よりエピポーラ調整の導入によりこの課題は解決され、本研究の目標が達成されていることが確認される。

いっぽう、図9はマクロレンズ（EOS 50D）に対する5個のデータセットに対する計測精度を示したものである。

図9より、まず注目できることはマクロレンズ（EOS 50D）の場合には3DiVisionはエピポーラ調整を考慮しなくても、極めて高い精度での三次元計測が可能であることが理解される。また、民生用カメラの場合にはエピポーラ調整の効果は小さかったのに対して、マクロレンズの場合にはエピポーラ調整が有効であることが確認された。この結果からも表6における検証結果と同様に焦点距離の更新が直接擬似基準点座標に効率的に反映されたと推測できる。

特に、3DiVisionでは相互標定の結果が得られる相似モデルに対して2点間距離を用いて擬似基準点座標の初期値を算出するため、距離設定が行なわれない軸方向に対する座標精度の低下が課題であったが、エピポーラ調整の導入によりこの課題は解決されることが確認された。

7. 結 論

本研究では簡便のデジタル写真測量の実用化を目指し、地上基準点を必要とせず、且つ事前に内部標定要素の算出を必要としないカメラキャリブレーション手法を提案し、エピポーラ調整を用いた精度改善について検討を行なった。その結果、焦点距離が短い民生用デジタルカメラに対してはエピポーラ調整の効果が小さいが焦点距離が長いカメラに対してはエピポーラ調整の効果が大きいこと、および焦点距離が短いカメラの場合でも撮影距離を大きく取ることにより焦点距離の長いカメラを使用する場合と同じ効果によりエピポーラ調整の効果が上がることが推測された。

特に、更新後の焦点距離は画像精度の向上に大きく寄与していることより、更新後の焦点距離の値を画面距離と捉えると画面距離が探索区間内に存在するような民生用デジタルカメラの場合にはエピポーラ調整は効率的に機能するものと推測された。

いっぽう、通常文化財の分野では1/50あるいは1/20程度の平面図が一般的であるがエピポーラ調整を考慮した3DiVisionは文化財計測の分野において十分有効な手法であることが確認された。

以上の結果より、本提案手法は地上基準点設置に伴う測量および事前の内部標定要素の算出も必要とせずに測定対象物の三次元計測を行なうことが可能であり、デジタルカメラによる簡便のデジタル写真測量を可能にするものと期待される。

(受付日2011.3.11, 受理日2011.5.13)

参考文献

江島裕司, 大嶽達哉, 近津博文, 2006. 民生用デジタルカメラの効率的カメラキャリブレーション手法に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 45, No. 4, pp.54-57.
高橋洋二, 近津博文, 2010. 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, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 49, No. 4, pp.260-268.
近津博文, 他3名, 2003. 民生用デジタ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, Vol. 42, No. 3, pp. 6-16.
柳 秀治, 近津博文, 2009. 近接デジタル写真測量におけるマクロレンズの有効性について, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 48, No. 6, pp.357-366.
Beyer H.A., 1991. An Introduction to Photogrammetric Camera Calibration, Invited paper, Seminaire Orasis, St. Malo, pp.37-42.
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., 1996. Design Aspects of Utilizing Digital Photogrammetry for Deformation Measurements. Proceedings of the 8th FIG International Symposium on Deformation Measurements, pp. 115-123.
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 1682-1777.
Habib A.F., Morgan M.F., 2003. Automatic calibration of low-cost digital cameras. Optical Engineering, 42(4), pp.948-955.
Laebe, T., Foerstner W., 2004. Geometric Stability of Low-Cost Digital Consumer Cameras. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 35(1), pp.528-535.