

複合型画像計測システムの開発とその応用について

Development of Image Based Integrated Measurement System and Its Application

大嶽達哉¹・近津博文²

Ohdake Tatsuya and Chikatsu Hirofumi

抄録：近年のセンサ技術の飛躍的な発展により、500 万画素を超える多種・多様な高解像度 CCD センサを搭載した民生用デジタルカメラが多数登場するに至り、民生用高解像度デジタルカメラによる簡便なデジタル写真測量が期待されている。

本研究では民生用 400 万画素デジタルカメラ、レーザレンジファインダを一体とした複合型画像計測システムの開発を行うことで、従来の写真測量のボトルネックであった縮尺距離および地上基準点を不要とし、本システムから計測対象物までの斜距離を条件としたカメラキャリブレーション手法と本システムの計測精度評価について述べ、さらに、その 3D 非接触計測システムとしての応用性を示す。

キーワード：デジタルカメラ、レーザ距離計、キャリブレーション、非接触計測、地形計測

Keywords : Digital camera, Laser range finder, Calibration, Non-Contact, Topography

1. はじめに

近年のセンサ技術の飛躍的な発展により、500 万画素を超える多種・多様な高解像度 CCD センサを搭載したデジタルカメラが多数登場するに至り、民生用デジタルカメラによる簡便な写真測量が期待されている。

このような技術的背景から、筆者らはこれまでに 300 万画素デジタルカメラの写真測量への応用性を学術的に検証し、さらにデジタルカメラによる簡便な写真測量用ソフトウェア“3DiVision”の開発を行ってきた¹⁾。しかし、本ソフトウェアも含め多くの写真測量用ソフトウェアでは内部標定要素が予め取得されている必要があり、さらに計測データを地上座標系に変換する際の絶対標定には対象空間内における 2 点間の実距離、あるいは 3 次元座標が既知な地上基準点が必要となり、これらの制約がデジタルカメラによる簡便な写真測量の実用化へのボトルネックとなっている。

筆者らは上記の制約を除くため、デジタルカメラ、レーザ距離計、パーソナルコンピュータなどを一体化させた複合型画像計測システムの開発を行ってきたが²⁾、精度の向上、操作性の改善などが課題であった。そこで、本論文では新たに開発された複合型画像計測システムに対して、その実用化のためのカメラキャリブレーション手法を示し、さらに IBIM の精度評価について検討を行った。また、IBIM の非接触計測システムとしての応用性を検討した。

2. 複合型画像計測システム

本研究で開発された複合型画像計測システム(Image Based Integrated Measurement System; IBIM)は操作性および軽量化を図ったもので、デジタルカメラ、レーザ距離計および 2 軸回転雲台(水平および鉛直回転)から構成され、レーザ距離計のレーザ軸は 2 つのミラー(全ミラーおよびハーフミラー)を介してデジタルカメラの光軸と一致するように設置されている。また、2 軸回転雲台の回転軸とカメラのレンズ中心とは一致するように設置されているためレンズ中心から計測点までの正確な斜距離が測定される。しかし、厳密にはレンズ中心とレーザ中心の位置は異なるので、本研究ではこの隔たり量を補正量として斜距離の測定値を調整している。図-1 は本システムの外観を示したものであり、図-2 はシステム構成図を示したものである。

なお、デジタルカメラには『OLYMPUS C-770 Ultra Zoom (有効画素数：400 万画素、拡大倍率：光学 10 倍)』を使用し、レーザ距離計には『Leica Disto Lite 4 (100m±3mm)』を使用した。

3. カメラキャリブレーション

従来の写真測量においては地上座標が既知な基準点と、その像点に対する画像座標を用いた空間後方交会法によりカメラの位置・姿勢である外部標定要素と焦

1：正会員 工修 東京電機大学 学生 理工学研究科応用システム工学専攻

(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂, Tel :049-296-2911, E-mail : ohdake@g.dendai.ac.jp)

2：正会員 工博 東京電機大学 教授 理工学部建設環境工学科

(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂, Tel :049-296-2911, E-mail : chikatsu@g.dendai.ac.jp)

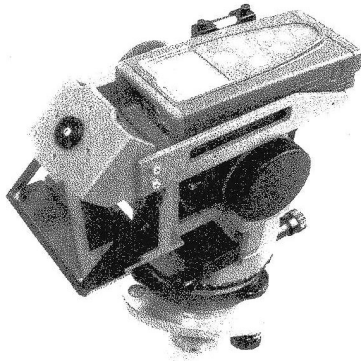


図-1 システム外観写真

点距離、主点位置のずれ、レンズ歪係数などの内部標定要素を求めるカメラキャリブレーション手法が一般的であるが、この際に利用される幾何学は撮影点O、像点 p_i および像点に対する基準点 P_i が一直線上にあるという共線条件であり、この場合各基準点に対して誘導される以下の共線条件式(式(1))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_0, Y_0, Z_0 =撮影点の位置； x, y =基準点の画像座標； X, Y, Z =基準点の3次元座標； $m_{11} \sim m_{33} = \omega$ ， ϕ ， κ からなる回転行列

本研究におけるカメラキャリブレーションとは測定の成果である基準点座標に変わりカメラ中心から測定される斜距離と共線条件式を用いて左右のステレオ画像に対する外部・内部標定要素を同時に取得しようとするものであり、そのためにはカメラ中心と計測対象空間内に存在する特徴点までの距離をレーザ距離計により最低5点以上計測する必要がある。なお、本研究では距離計測が行われる特徴点を擬似基準点と定義するが、これらの特徴点は画像上で認識できれば良いもので、その3次元座標は既知である必要はない。

一方、本カメラキャリブレーション手法における未知量は、外部標定要素である左右カメラの位置(X_{OL}, Y_{OL}, Z_{OL})、(X_{OR}, Y_{OR}, Z_{OR})、姿勢($\omega_{OL}, \phi_{OL}, \kappa_{OL}$)、($\omega_{OR}, \phi_{OR}, \kappa_{OR}$)および左右カメラに共通な内部標定要素であるカメラの焦点距離 f 、主点位置のずれ x_0, y_0 、レンズ歪係数 k_1, k_2 、画像座標から画素座標への変換係数 a_1, a_2 および擬似基準点の3次元座標(X_i, Y_i, Z_i)となる。すなわち、擬似基準点数を n 個とすると合計 $19+3n$ 個となるが、本研究では擬似基準点のうち1点を原点にとり、さらに軸方向を規定するものとしてX軸上にもう1点をとると、これらの座標はそれぞれ(0,0,0)および($X_2, 0, 0$)となるから、結局未知量は5個減少して、合計 $19+3n-5$ 個となる。

ところで、これら $19+3n-5$ 個の未知量に対して得ら

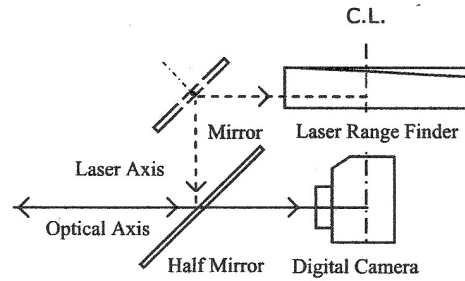


図-2 システム構成図

れる条件式は左右の画像における各 n 点の擬似基準点から $2 \times n$ 個、計 $2 \times 2n$ 個の共線条件式(式(1))であるが、カメラ中心から各擬似基準点までの斜距離に対する式(2)が観測方程式として得られるので、左右画像に対して計 $2n$ 個の条件式が加わり合計 $\{2 \times 2n$ (共線条件式) $+ 2n$ (距離条件式) $\}$ 個の条件式が得られることになる。例えば、擬似基準点数が5個の場合には未知量は29個であり、条件式の数30個となる。したがって、 $2 \times 2n$ (共線条件式) $+ 2n$ (距離条件式) $> 19+3n-5$ (未知量) を満足するためには計測対象空間内に5点以上の擬似基準点が必要となり、各未知量は式(3)を用いて最小二乗法にしたがって算出されることになる。なお、擬似基準点が5点の場合は余測定数が1であるため、本研究では6点以上を対象とした。

$$D_i^2 = (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 \quad (2)$$

$$H = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (p_1 (\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2) + p_2 (\Delta D_{ij}^2)) \Rightarrow \min \quad (3)$$

ここに、 $\Delta x, \Delta y$ =画像座標に対する補正量； ΔD =斜距離に対する補正量； i =擬似基準点番号； j =画像番号； M =擬似基準点数； N =画像数

なお、式(3)中の p_1, p_2 は画像座標と測定距離に対する重みである。この重みは統計的もしくは計測精度を考慮して定められるべきであり、本研究では様々な重みを用いて検証を行ったが、キャリブレーション結果に顕著な差は見られなかった。また、余測定の数で十分でない場合を除けば、重みの影響は少ないという著者らの経験とも一致するため、本研究ではこれら重みを全て等しい重み (= 1) とした。

4. 精度検証

本研究で開発した複合型画像計測システムに対する性能評価を検討するために以下の検証実験を行った。

(1) カメラ光軸とレーザ軸の一致

複合型画像計測システムに対する性能評価を行うた

めに、まずカメラの光軸とレーザ軸の一致について以下の検討を行った。

図-3 (a) に示す白黒ターゲットを本システムから1mの位置に据え、ターゲット中心を画面中心に捕らえたのち、ターゲット中心にレーザを照射し、そのときの画像を取得し、ターゲット中心に対する画像座標を手動にて読み取る。本実験では2m, 5m, 10m, 20m, 30mの計測距離に対しても上記の実験を繰り返した。なお、図-3 (b) は計測距離2mにおける撮影画像を示したものであるが、計測距離が長くなるにつれてレーザの照射点を画面上では認識できなくなるため、本研究ではレーザがターゲット中心に正しく照射されているかはターゲット上にて目視で確認をしている。表-1 に各計測距離におけるターゲット中心に対する画像座標を示す。

表-1 より、計測距離の違いにより画像座標に多少の違いが認められる。ところで、本実験ではターゲットの画面中心座標は撮影画像を拡大して目視で行っているため、計測距離が長くなるにつれて、目視でもその中心位置の判読が困難であることを考慮すると、本システムにおけるカメラ光軸とレーザ軸とは一致しているものと判断される。

(2) 読み取り精度

本システムにより得られる3次元精度は距離精度、擬似基準点の画像座標に対する読み取り精度および擬似基準点数に依存するものと推測される。このうち、

表-1 計測距離と画像座標の関係

計測距離	x(pixels)	y(pixels)
0.999m	1141	850
2.047m	1139	847
5.012m	1143	849
10.078m	1143	852
19.995m	1144	850
30.048m	1146	853

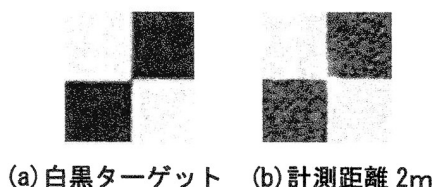


図-3 ターゲット中心部の拡大図

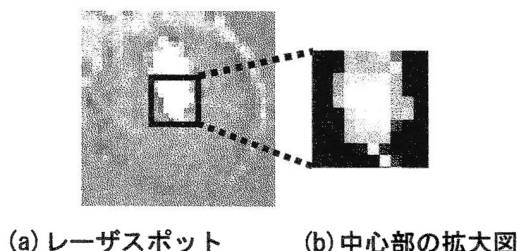


図-4 レーザスポットの中心画素

距離の測定精度に影響をおよぼす要因は偶然誤差のみであるので、5回の平均値を採用することとしたが、レーザはある広がりを持ってターゲットに照射されるため、ターゲット中心に対する画像座標の取得が問題となる。図-4 (a) はシステムから1mの距離に対するレーザスポットの画像であり、図-4 (b) はレーザスポットの中心部分を拡大し、さらに階調を補正し、レーザの反射強度を明確化させたものである。本システムで使用したレーザ距離計より照射されるレーザ光の照射範囲は図-4 (a) に示すように楕円形状を示す特長があること、また図-4 (b) より反射強度の一番強い部分は約1.5画素程度であることが理解された。したがって、本論文では擬似基準点および以下に述べる検証点に対する画像座標の読み取りは画素単位で行うものとした。

(3) キャリブレーション手法の評価

ここでは検証点に対する精度と擬似基準点数との関係を含めて複合型画像計測システムにおけるキャリブレーション手法の評価を行うもので、図-5 に示すテストターゲット(H:480mm, W:640mm, D:50mm)を用いて精度検証実験を行った。このテストターゲットの円形(黒丸)の加工精度は0.05mmであり、ターゲット周囲の⊕は擬似基準点を示し、格子線の交差部にあたる42点を検証点とした。

なお、これら検証点の中心画像座標は黒丸部分の面積重心を画像処理により求めた値を整数値に丸めたものとする。また、図-3中の1番および2番の擬似基準点を原点およびX軸方向を規定する点とした。

一方、左右のステレオ画像に対する撮影位置から計測対象物までの撮影高度はともに約1000mmであり、左右の撮影位置間の基線長は約400mmとし、焦点距離は固定で撮影を行った。

表-2は42点の検証点に対する平均二乗誤差を示したものであり、理論精度とは撮影高度、焦点距離、基線長および画像座標の読み取り精度を用いて視差方程式から誘導される式(4)より算出される値であり、写真測量の分野では精度の判定に広く利用されているものである³⁾。なお、式(4)における画像座標の読み取り精度は1画素に対応する0.003mmとした。

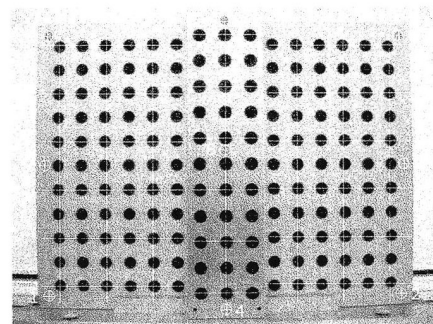


図-5 テストターゲット

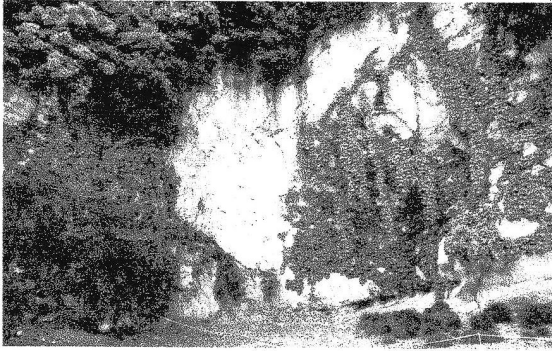


図-6 計測対象地

表-2 検証点に対する平均二乗誤差

測距数(擬似基準点)	$\sigma_{XY}(\text{mm})$	$\sigma_Z(\text{mm})$
6(1~6)	0.608	1.456
7(1~6+8)	0.574	1.530
8(1~6+7,9)	0.606	1.580
9(1~6+7,8,9)	0.624	1.576
理論精度	0.407	1.019

ここに、 σ_{XY} = 平面精度、 σ_Z = 奥行き精度

$$\sigma_{XY} = \left(\frac{H}{f} \right) \sigma_p, \quad \sigma_Z = \left(\frac{H}{f} \right) \left(\frac{H}{B} \right) \sigma_p \quad (4)$$

ここに、 H : 撮影高度、 f : 焦点距離、 B : 基線長、 σ_p : 画像座標の読み取り精度

表-2より、平面座標および奥行き座標の精度とも理論値より多少低い値（理論値の約1.5倍）を示しているものの、これらの結果は擬似基準点数または基準点測量で言う図形の強さに左右されず、理論値の約1.5倍程度の精度が得られることが理解された。したがって、本論文で示したカメラキャリブレーション手法の有効性が示されたものと判断される。特に、複合型画像計測システムの運用は計測対象物に完全非接触であることを考慮すると、複合型画像計測システムは危険地域に対する地形計測の3D計測にとって有効な手法になり得るものと期待される。

5. IBIMの応用

本研究では複合型画像計測システムの非接触計測システムとしての応用性を検討するため、崩落危険地域に対する地形計測への応用性を検討した。

計測対象とした場所は埼玉県東松山市に所在する幅約7m、高さ約10mの崖であり（図-7）、図-7に見るように、この崖ではすでに小規模な崩落が発生しているため立ち入りが規制されている危険箇所である。したがって、このような地域に対しては従来の写真測量では計測不能な場所であり、最近の計測方法としてはレーザスキャナが使用されるが、本研究では複合型

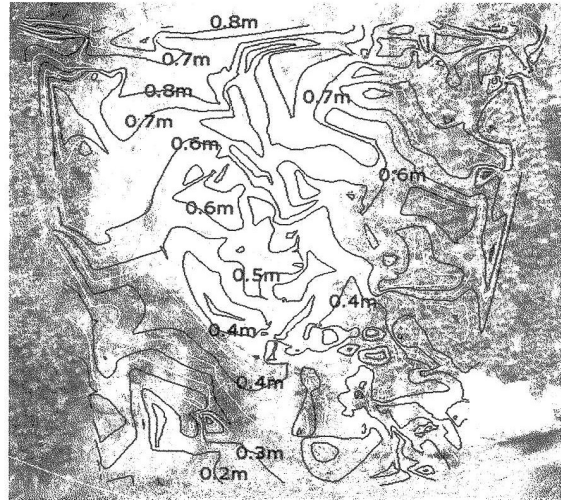


図-7 地形図

画像計測システムによる計測を試みた。

図-7は作成された地形図(等高線間隔 50mm)を画像と重ね合せた結果であり、図-7よりこの崖面はオーバーハング形状を呈していることが理解される。

なお、左右のステレオ画像に対する撮影位置から計測対象面までの撮影高度はともに約15mであり、基線長は約5mとし、焦点距離は固定で撮影を行った。また、ここでは6点の擬似基準点に対する距離の測定値を用いてキャリブレーションを実施した。

6. おわりに

本論文では筆者らにより新たに開発された複合型画像計測システムに対するカメラキャリブレーション手法を示し、その精度評価を行った。その結果、本システムより得られる平面座標および奥行き座標の精度は理論値の約1.5倍であり、またこれらの精度は擬似基準点数または基準点測量で言う図形の強さに左右されないことを示した。

また、複合型画像計測システムを危険地域の地形計測に応用することでその非接触計測システムとしての有効性を示した。

しかしながら、多視点画像の重ね合わせ、さらにはステレオマッチングの効率化は今後の課題である。

参考文献

- 1) 近津博文, 國井洋一, 中田隆司, 大嶽達哉; 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.423, No.3, pp.6-16, 2003.
- 2) 金子順紀, 大嶽達哉, 近津博文; デジタルカメラとレーザー距離計を複合させた画像計測システムの開発について, 写真測量とリモートセンシング, Vol.43, No.2, pp.75-79, 2004.
- 3) Clive S. Fraser; Design Aspects of Utilizing Digital Photogrammetry for Deformation Measurements. Proceedings of the 8th FIG International Symposium on Deformation Measurements, pp.115-123, Hong Kong, 1996.