

P37. 石垣動態観測への精密写真測量の応用

Application of Precise Photogrammetry to Observation of Stone Walls.

○森山哲朗, 萩原育夫 (サンコーコンサルタント)
 西山 哲, 矢野隆夫, 大西有三 (京都大学大学院工学研究科)
 Tetsuro Moriyama, Ikuo Hagiwara,
 Satoshi Nishiyama, Takao Yano, Yuzo Ohnishi

1. はじめに

デジタル写真技術の進展に伴って各種土木建造物の形状把握に精密写真測量手法の導入が進められている。精密写真測量手法は、現地作業（撮影作業）の自由度が比較的高く、崩壊（変状）の進行把握等の点検・動態観測業務への適用が期待される。一方、精密写真測量の計測誤差は、撮影用カメラの仕様や基準点の取り扱い方によって変化し、このような動態観測への応用においては、計測対象物の変状特性や導入目的に応じて適切な撮影・解析方法を策定することが必要となる。

本検討では、城郭石垣の動態観測に精密写真測量を試験導入して、変状特性や計測誤差の程度・要因を検討した。さらに、石垣背面の孔内傾斜計観測結果との比較を通じて、精密写真測量の動態観測における適用性や導入時の留意事項について考察した。

2. 写真測量の原理

2.1 計測原理

ある一つの物を少し離れた 2ヶ所から撮影した 2枚 1組の写真を左右の目で別々に見ていると、やがて二つの像が一つに重なり、実物が立体的に目の前に浮かび上がってくる。これは 2次元のものを 3次元的に視覚化する実体視と呼ばれる手法である。例えば、この実体視を使うことで、地上の 2箇所からある物体を撮影し、当被写体についての三角測量を写真から行うことができる。これをさらに応用したものが写真測量であり、航空機から広範囲に地上の物を測量し、それから地図などを作成する作業が数多く実施されている。

土木分野においてはデジタルカメラを利用した測量も既に活用されているが、本報告にて試行するのは 3次元変位を高精度に計測する技術であり、これを従来の技術と区別するために精密写真測量と称している。解析原理などは従来の写真測量を使用するが、被写体の形を高精度に 3次元的に復元するための工夫を加えている。次に、この精密写真測量が行っている工夫について記述する。

2.2 解析原理

航空写真を用いた測量はもとより、地上で撮影された 2枚一組の写真から貯水量や土量の計算を行う計測システムは、既に多くの実績を上げている。この技術を被写体である建造物の変位計測や動態観測に適

用できるように発展させ、しかもデジタルカメラの利用によってリアルタイムでの計測を実現させようとするのが精密写真測量である。幾何学から求められる被写体の画像とその計測したい箇所の座標とを結び付ける方程式を数 10 枚の画像から構築し、最小二乗法を使うことで高精度の解を算出する原理を用いる。

図-1 に精密写真測量の測定の手順を示す。対象物上にはターゲットと称している目印（標点）を設置する。これは、撮影の際にカメラの光を反射させる材料で作られているものであり、ストロボ光を反射するために容易に当標点を画像上で認識することができる。この標点を用いてカメラの位置と撮影時の姿勢（カメラの角度）を求める。標点を設置することのできる対象物では、カメラの位置と姿勢を求めた後に、この画像上のターゲットの 2次元座標を画像処理で求め、その値から今度は対象物上の標点の 3次元座標を算出していく。標点を設置することのできない被写体では、撮影時の際のみ標点を被写体近傍に設置し（以下ダミー標点と称する）、その値からカメラの位置と姿勢を求め、次に対象物上の目印を画面上で仮想的に操作者が任意に設定していく。

デジタル写真測量による変位計測法



図-1 精密写真測量の計測の手順

本手法での未知数と標点の座標の算出原理を図-2 に示す。未知数は標点の 3次元座標と写真撮影時のカメラの位置と姿勢などである。これは、同時に撮影時のカメラの位置や姿勢を任意のままに撮影できることを意味し、カメラを三脚などで固定せねばならないなどの煩わしい操作が一切要らないことになる。ただ、高精度を追求するために障害となるものの一つに、デジタルカメラのもつレンズ歪などの内部構造に起因

する誤差がある。これを解決するためには、内部構造が既知である工業計測用に開発された高価なカメラを用いるか、あらかじめ精密に計測された対象物を撮影して、自分でカメラの較正を行う作業が必要となる。しかしこれでは、計測に要するコストが高くなり、またカメラの較正作業に多大な手間を要するものになってしまう。本計測システムでは、レンズ歪などカメラ自体が持つ不確定な部分も数式化して、カメラの位置や角度と共に算出する手法を採用する。これはセルフキャリブレーション法と呼ばれ、やはり航空写真を使った計測において利用されてきた手法である。これにより市販のデジタルカメラを使っても、カメラ自身が持つ誤差が解消された高精度の計測が可能となる。

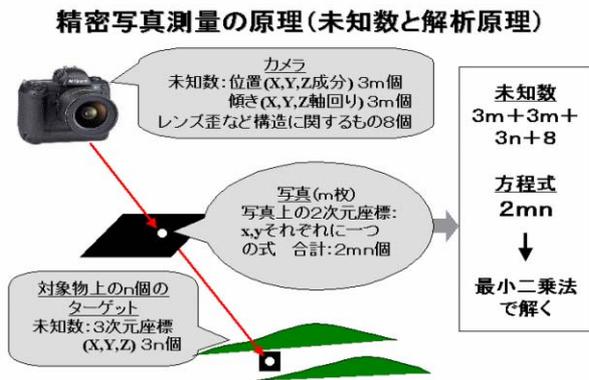


図-2 写真測量の解析原理

2.3 計測における座標算出方法

図-2 に示す未知数を求めるにあたっては、よく知られた最小二乗法という計算を使う。例えば、対象物に標点を 100 個設置し、それを 20 枚の写真に撮影した場合、次のような計算を行う。

- ・標点の 3 次元座標：1 個について (x,y,z) の 3 つがあるから、 3×100 個 = 300 個
- ・カメラの位置：写真 1 枚について (x,y,z) の 3 つがあり、 3×20 枚 = 60 個
- ・カメラの角度：写真 1 枚について X 軸、Y 軸、Z 軸それぞれの座標軸の回りの角度があるから、 3×20 枚 = 60 個
- ・カメラの内部構造に関する未知数

これは、レンズ歪を表現するモデルのパラメーターがそのまま未知数の数になるが、焦点距離なども未知数にして、一般に 8 個位が設定される。

以上より、未知数の数は

300 個 + 60 個 + 60 個 + 8 個 = 428 個となる。

一方、解を求めるために立てられる方程式は次の通りである。

・標点のデジタル画像上の 2 次元座標 (x,y) と対象物上の 3 次元座標 (x,y,z) を関係付ける方程式が幾何学的に導かれる。この方程式を使って、2 次元座標 (x,y) から 3 次元座標 (x,y,z) を求めれば良いのであるが、デジタル画像上の 2 次元座標 (x,y) それぞれ

に一つ方程式が成立するので、標点 1 個につき 2 つの方程式が生み出される。そこで全部で次のような数の方程式ができあがる。

2 個/標点 1 個 × 設置した標点 100 個 × 画像の枚数 20 枚 = 4000 個

つまり、428 個の未知数を 4000 個の方程式を解いて求める。この時、計算する際の誤差を最も小さくするように未知数を決定するのが最小二乗法という手法であり、計測においても頻繁に使われている高精度を得るための計算手法である。

図-3 にはターゲットを付けたマイクロメーターを室内の壁に設置し、マイクロメーターで与えられる変位を、どの程度の分解能で精密写真測量が捉えるかの実験をした例を示す。

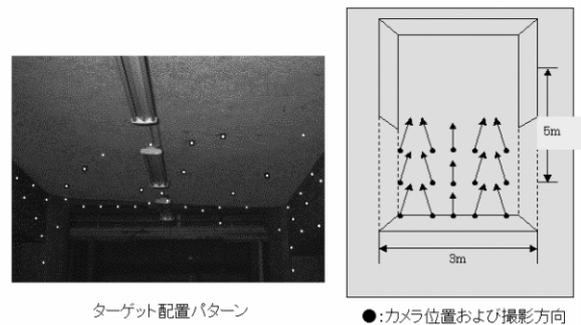


図-3 精度検証実験

写真撮影に当たっては図に示すように、対象物をいろいろな角度から撮影する。これは、同じ位置で撮影した同じ写真を使っても方程式の数が実質上、増えたことにならないからである。

図-4 には、変位の X,Y,Z 軸それぞれの方向の分解能を示す。但し、Z 軸方向はカメラの光軸方向、X 軸は水平、Y 軸は高さ方向である。撮影距離が 5m 程度であれば、数 $10 \mu\text{m}$ の分解能があることが検証できた。

画像枚数	42枚
X軸方向の分解能	0.04mm
Y軸方向の分解能	0.02mm
Z軸方向の分解能	0.09mm

$$\text{理論誤差} = \text{画像座標誤差} \times \text{撮影距離} \div \text{焦点距離}$$

$$0.08\text{mm} = \{1 \text{ pixel}(9 \mu\text{m}) \times 1/20\} \times 5\text{m} \div 28\text{mm}$$

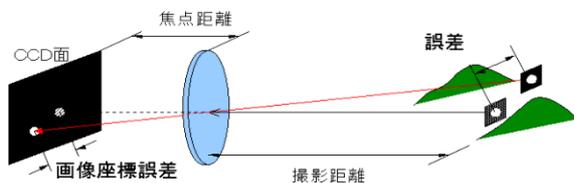
図-4 精密写真測量の分解能

精密写真測量の精度は方程式の数、即ち(標点の数) x (写真枚数) の増加によって向上するが、それがあがる程度満足された場合、どの程度の精度が理論的に得られるのかは(カメラの画素数)(撮影距離)などで決定される。(図-5 参照)

精密写真測量は、画像上の標点の 2 次元座標を読み取り、その値を使って被写体が存在する空間における標点の 3 次元座標を計算するものである。この場合、

精密写真測量において生じる誤差は、画像上の標点の 2 次元座標の読み取り値において生じ、それが (撮影距離) / (レンズの焦点距離) で決定される縮尺倍されて最終的な誤差となる。従って理論的には、画像上の標点の 2 次元座標の読み取り誤差 : (画像座標誤差) と縮尺 : (撮影距離) / (レンズの焦点距離) との積で誤差を見積もることができ、計測時はその誤差以下の計測ができる、すなわち計測時の分解能を大まかに把握することができる。また、2 次元座標の読み取りは、撮影時の環境やデジタルカメラの画素数によって変化するが、最終的には計測終了時に標点の 3 次元座標と共にどの程度の精度で 2 次元座標を読み取れたのかが計算で算出される。これまでの実験では、標点にターゲットを設置すれば CCD 素子の 1 pixel の大きさ (約 9 ミクロン) の 1/20 の精度で座標を読み取れることが確かめられている。

本検討の城壁石垣を対象とした計測では、維持管理・文化財保護・景観等の観点からターゲットの設置が困難であり、既に述べたように画像上で任意の計測点を解析者が設定するものとした。この場合、任意に設定した標点の読み取り精度が、どの程度の計測誤差として現れてくるのかが問題になる。この誤差を検証すると共に、計測結果より今後の実用化のための検討を行うことが本報告において実施した計測の試行の目的である。



$$\text{理論誤差} = \text{画像座標誤差} \times \text{撮影距離} \div \text{焦点距離}$$

図-5 誤差の考え方

3. 城郭石垣における試験計測

3.1 計測点の設定

計測の内容は次の通り。

- ・写真枚数 : 3 箇所から合計 12 枚撮影
1 箇所からカメラの角度を変えて 4 枚撮影した。
- ・ダミー標点 : 50 個設置
水準測量用のスタッフに反射材を塗布した標点を貼り付けたものを 4 本撮影時に城壁に立てかけてダミー標点とした。
- ・変位計測点 : 29 点を画像上で抽出して設定した計測時の状況を図-6 に示す。

測量用スタッフに貼付したダミー標点を使って撮影時のカメラの位置と姿勢を求めることにより撮影時の状態をパソコン上で復元し、その後画面上で変位を計測したい箇所を設定した。図-7 に計測点を画面上で設定した状態を示す。



図-6 撮影時の状況



図-7 ダミー標点(スタッフ上)と計測点(石垣上)

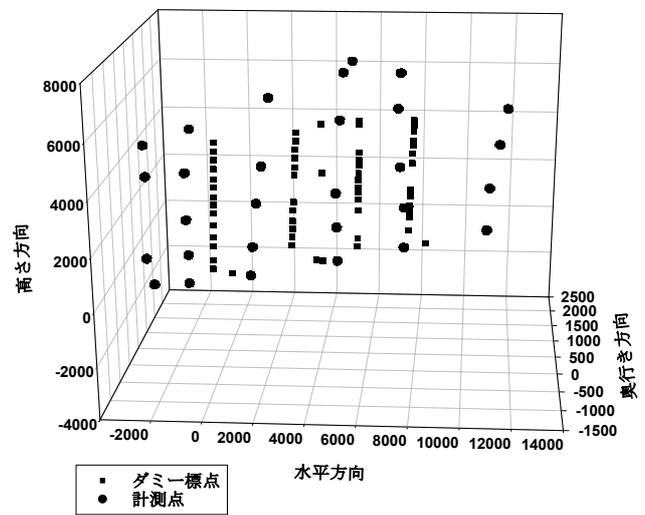


図-8 解析結果 (図中の単位は mm)

3.2 計測点の座標抽出

図-8 にダミー標点と計測点の 3 次元座標を算出した結果を示す。

計測の分解能は次の通り。

- ・水平方向 : 1.45mm
- ・高さ方向 : 1.6mm
- ・奥行き方向 : 2.45mm
- ・3 方向の平均 : 1.89mm

図-4 に示した室内実験に比較して計測精度が低下しているのは、標点を画面上で操作者が任意に設定す

る際に, 実験的に石垣の特徴の無い部分を数多く設定したことにより, 標点の読み取り誤差が大きくなったためである。また, 今回使用したレンズはできるだけ広範囲を一度に計測するために焦点距離 18mm のものを使用した。28mm 以上の焦点距離のレンズを用い, 計測点として特徴のある部分を撮影前に明確に決定し, 常にそれを計測するように工夫することで, 分解能を向上させることが可能になると考えられる。

3.3 計測座標の経時変化

石垣の変形挙動監視に関しては「基準点を必要としない手法」を考慮して, 2 点間の距離に着目して 8 ヶ月間における経時変化を抽出・集計した。集計結果例を表-1 と図-9 に示す。図-9 では, 3 回目の計測と 1 回目の計測結果において, 2 点間の距離変化が認められた箇所を格子状に示した。今回の計測期間では, 観測点格子に若干の拡大傾向が認められた。

表-1 計測ポイントの 2 点間距離の経時変化

標点距離	第 1 回計測 距離初期値 (mm)	第 2 回計測 距離変化量 (mm) (4 ヶ月後)	第 3 回計測 距離変化量 (mm) (8 ヶ月後)
132-133	1061.89	2.88	3.56
133-134	2442.10	2.96	3.12

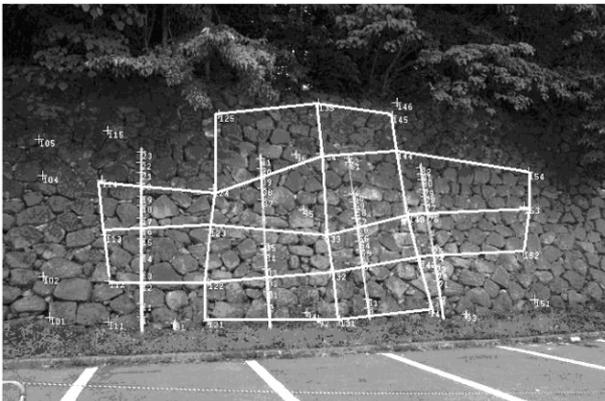


図-9 標点間距離の変化位置

4. 検 討

ダミー標点を用いた今回の計測の試行では約 2mm 程度の精度 (分解能) の計測が実施できた。また, 計測点の 3 次元座標を算出し, それから 2 点間の距離を求め, その変化率で危険な箇所の抽出を試みた結果, 今回の観測期間 (8 ヶ月) における 2 点間距離の経時変化量は 3mm 程度であった。当該箇所では孔内傾斜計観測等による動態観測が別途実施されており, 石垣中央部～上部で水平方向に数 mm/年程度の押し出し状の変位が観測されている。今回の精密写真計測における経時変化量は計測精度と同レベルであったことから, 他の観測記録との定量的な比較が困難となったが, 押し出し状の変位が捉えられた点でこれらの観測結果

間に矛盾は認められない。今回確認した精密写真測量の分解能から, 基準点を計測点に含めることによって数 mm/年程度の変位を示す石垣の監視において精密写真測量が有効と考えられる。

一方, 今回の試行から, 石垣のはらみだし方向における測定誤差が相対的に大きいことが導入時の課題として考えられ, 計測方法に関する改善ポイントとして以下が考えられる。

(1) 計測座標系の設定

撮影軸を石垣の延長方向と斜交させる等により, 変位方向を考慮した座標軸系の導入。

(2) ターゲットの最適配置

計測座標系, 変位方向, 変位速度並びに作業性等を考慮したターゲット (ダミー標点) の最適配置及び基準点等の必要最小限のターゲット設置。

(3) 任意標点の抽出誤差の低減

凸部の自動抽出機能等による任意標点の抽出誤差の低減。

また, 動態観測で一般的に用いられている各種観測手法と比較した場合, 今回用いたノンターゲット (計測点にターゲット設置しない) 方式の精密写真測量の特徴として下記が挙げられる。

- ・ 軽微な現地作業によって広範囲のデータの収集が可能
- ・ 計測点の変更等に柔軟に対応可能
(写真記録から過去に遡った標点の変更も可能)
- ・ 計測精度は相対的に中位

動態観測に用いる計測手法は, 観測対象の変状メカニズムや変位速度等に基づいて選定する必要がある。ノンターゲット方式の精密写真測量は, 上記の特徴から, 要注意箇所の抽出段階等において導入効果が期待でき, 精密写真測量を含めた監視体制の構築が今後有効と考えられる。

参考文献

- 1) 西山哲・大西有三・大津宏康・矢野隆夫・緒方健治・松山裕幸 (2002) : 精密写真測量による斜面崩壊モニタリングシステムの研究, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, I12.
- 2) 西山哲・大西有三・大津宏康・矢野隆夫・龍明治・李徳河 (2004) : デジタル画像計測法の斜面防災モニタリングシステムへの応用に関する研究, 応用地質, Vol. 44, No. 6, pp. 331-340
- 3) 日本写真測量学会編 (2002) : デジタル写真測量