

岩盤斜面の画像計測モニタリング手法の研究

西山 哲^{1*}・大西 有三¹・矢野 隆夫¹・天野 淨行²・村上 治³

¹京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²(株)高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

³つくばソフトウェアエンジニアリング(株) (〒101-0041 東京都千代田区神田須田町2-6-1坂下ビル 6 F)

*E-mail: nisyama@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本論文においてデジタルカメラで撮影した画像を使って、斜面の挙動をモニタリングするための技術に関する研究例を紹介する。画像を利用したモニタリング手法には、さまざまなものが開発されてきたが、変位を高精度で計測する手法としては、さまざまな箇所からの撮影によって得られた数多くの画像を用いた精密写真測量技術は計測の簡便さに優れたものの一つである。ここでは精密写真測量技術を斜面のモニタリングとしての手法に適用するための幾つかの課題を整理し、高精度で計測するための方法を記述するとともに、その応用例を通して斜面の挙動を把握するモニタリング手法としての実用性を検証する。

Key Words : photogrammetry, monitoring of slope, digital image, precision and accuracy

1. はじめに

斜面モニタリングの技術としてデジタル画像を利用した計測手法が研究されてきた。これはデジタル画像を用いた計測技術が次のような特徴をもつことによる。

- ・ 遠隔からの計測が可能であること。
- ・ 広範囲に対象物の変状を捉えることができる。
- ・ 計測に要するコストを低く抑えることが可能である。
- ・ 計測作業を簡便にできる可能性がある。

デジタル画像を使った計測は、航空機など空から撮影した画像を用いる手法もあるが、市販のデジタルカメラを利用して地上から撮影した画像を利用する手法が土木分野に広がろうとしている。これは、これまで主に室内での工業製品の検査等に利用されてきた計測手法を応用しようとするものであり、前述の利点を活かして斜面モニタリングにも適用しようとする事例も多くなってきた。しかしながら工業製品を対象にする場合とは異なり、斜面を計測対象とした場合には次の問題が発生する¹⁾。

- ・ 遠方であるために撮影距離が大きくなる。一般に撮影距離が大きくなると、いわゆる縮尺比が大きくなると同時に、撮影の位置に関する自由度が小さくなるため計測精度が低下する。
- ・ デジタルカメラの技術的な発展は急速にすすんでいるものの、使用するデジタルカメラの仕様と計測手法の関係などは明らかになっておらず、撮影方法ごとに計測精度が変わってしまうことが多い。

これら課題がありながらも、斜面の広範囲な部分にわたっての面的な挙動を連続的に評価する手法として、従来から使用されている測量機器に比べて、計測に要する人的および時間的コストは画像計測の方がはるかに有利であるため、斜面モニタリングとして応用されることへの期待は大きなものがある。本論文はこのような背景を鑑み、斜面を計測対象とした場合の画像計測の問題点とその解決法を整理し、斜面監視技術としての有用性をあらためて考察することを試みる¹⁾。

2. 画像計測の理論的背景

画像計測という呼称は広範囲の技術を含むが、土木構造物の変位を計測するという研究例では、いわゆる従来の航空写真測量技術で用いられてきた理論をデジタルカメラで撮影された画像を用いる手法に転用したものが主流となっている。すなわちデジタル写真測量と称する技術が主流である。なかでも、モデル化ではなく変位を計測するのが目的の場合は近接写真測量と称される近距離にある対象物を被写体とした技術を応用することが多い。これら手法において基本原理は共通しており、図-1に示すように、計測点 P 、レンズ中心 X_0 、そして画像上の計測点の像 p が一直線上に存在するとする条件に基づく。なお c はレンズの焦点距離に相当する画面距離を表す。画像面上の画像座標系 xy と、レンズ中心を原点とした

カメラ座標系 xyz 、および地上座標系 XYZ を考えた場合、基本になるのはこの幾何学的関係から導かれる式(1)の共線方程式である。

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

すべてのデジタル写真測量はこの式を原理とすると言っても過言ではない。地上座標系を Y 、 X および Z 軸の回りに順次回転させてカメラ座標系に一致させたときの回転を表す行列の成分が m_{ij} である。

次に式(1)にはカメラの内部構造に起因したレンズ歪みや主点位置のズレによる誤差が発生する。主点とはレンズの中心から画像面に垂線を下ろしたときの画像面との交点であり、レンズ歪みによって画像面の中央に存在しない場合は観測値の計測値に影響することになるので、これを補正する必要が生じる。一般的には、レンズ歪み等に起因するこの系統誤差をモデル化することによって未知数とし、計測と同時にカメラ校正も行う。これをセルフキャリブレーション法と称する。これによって、非計測カメラすなわち市販のデジタルカメラを使用して計測を行う手法が広まった。しかしながら、この系統誤差のモデル化自体、その妥当性が十分に検証されているとは言い難く、セルフキャリブレーション法は計測作業を簡便にはするが、レンズ歪みの影響が大きくなる撮影条件下では推奨できない。

さらに式(1)は未知数に関して非線形の形をしているため、各未知数を近似値と補正量に分け、近似値の回りでテーラー展開することにより方程式を式(2)のように線形化し、各種数値計算法を適用して解くことになる。

$$\mathbf{v} + \sum_{i=1}^3 A_i \mathbf{x}_i = \mathbf{e} \quad (2)$$

ここで、 A_i は係数行列で、 $\mathbf{x}_i$ は各未知数の補正量からなるベクトルを表すが、添字1は外部標定要素と称する撮影時のカメラの位置と角度、添字2は内部標定要素と称するカメラのもつ系統誤差、および添字3は計測点に関する量を表す。 $\mathbf{v}$ は計測点の像の2次元座標の測定残差よりなるベクトルであり、 $\mathbf{e}$ は観測値と共線条件式による理論的な座標値との差よりなるベクトルである。

3. 斜面モニタリングのための課題

ここで斜面モニタリングへ画像計測を適用する際の課題を整理する。式(2)に関して、未知数の最確値は $\mathbf{v}$ の2

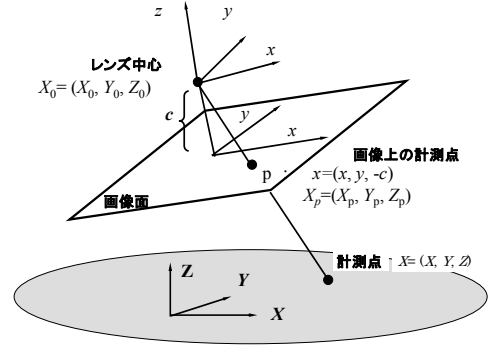


図-1 中心投影による幾何学的関係

乗値を最小にする条件の下で求める。その際、 A_i を A および $\mathbf{x}_i$ を $\mathbf{x}$ と略して記述すると、式(3)の条件下で未知数を求めることになる。

$$(A^T A) \mathbf{x} = A^T \mathbf{e} \quad (3)$$

一般的な解法は式(3)の左辺の左から $(A^T A)^{-1}$ を掛けて未知数を求める。しかしながら、この場合には $(A^T A)^{-1}$ が逆行列をもつことが必要であり、それは図-1における座標系をどのように決定するのかの問題に帰依する。座標系は自由に決定することができ、これは観測方程式に7つのランク落ちが発生しているためである。7つというのは、自由度が座標軸を固定するために各軸方向の並進に関して3つ、回転に関して3つ、さらに座標軸の長さに関する情報である。座標値が既知の固定点を配置すれば座標軸は決定されるが、一般的に斜面上に固定点を配置するのは容易でなく、座標軸をどのように決めるかという問題はゼロオーダーデザイン (Zero Order Design) と称され研究の対象になってきた。数値解析法としてはMoore-Penrose型の一般逆行列を求めて解けば、固定点を設けることなく未知数を求めることができる。測量においては座標軸を決定するための拘束条件を同時に設けるフリーネット網解法といわれる方法に相当する。しかしながら、この解法は固定点を設けずに座標軸を決定するという概念が一般的に受け入れ難く、また得られた解は未知数の分散値を最小にする値となっているにもかかわらず相対的な値であるため、変位を計測するためには結局どこかを基準点とするしかなく、特に3次元的な挙動を求めるためには、あらたな解法に頼る必要が生じる。

次に求めた未知数の推定値の標準偏差は内的誤差と称するが、これは画像枚数あるいは計測対象物とレンズ焦点距離の比いわゆる縮尺比などの撮影条件と内的誤差 Σ_x は式(4)のような関係がある。

$$\Sigma_x \propto \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot \frac{d}{c} \cdot \hat{\sigma}_0 \quad (4)$$

ここで d はカメラから対象物までの距離、 c はレンズの焦点距離であり、また k はひとつの撮影場所から写した画像枚数の平均値であり、 q は撮影位置や撮影の姿勢および計測点の配置などから決定される撮影形態に関する係数であり、これを決定する方法はファーストオーダーデザイン (Zero Order Design) といわれる問題と称され、試行錯誤的に解決しているのが実情である²⁾。しかし、これも斜面を対象にした場合では室内での撮影と異なり、撮影位置が限定されており、選択の余地が少ないために定量的に計画するのが困難なものとなる。この他にも図-2 および図-3 に示すように、セカンドオーダーデザイン (Second Order Design) およびサードオーダーデザイン (Third Order Design) と称される課題があり、前者は用いるカメラの画素数と撮影枚数の関係を計測コストの観点から論ずる問題、後者は斜面の広範囲を計測する場合と局所的な箇所を計測する場合とでの計測方法の相違を論じる問題に関するものであり、画像計測が信頼性を得て広く普及するためには、この4つの課題が解決されなければならないが、その解決法を今後明確に示していくのが研究課題である。

4. 課題解決の検討

画像計測による斜面モニタリングを実際に試行し、前述の課題を検討した。計測対象は幅300m、高さ50mよりなる法枠工を施した切土法面である。図-4は法面と撮影位置の関係を示す。法面上には計測点としての認識を容易にするため、白色の鋼板からなる400mm角のターゲットを法枠工の上段に6個、中段に8個、さらに下段に8個ずつ設置した。また長さ情報を得るための基準尺を水平方向と鉛直方向の2方向1組として5箇所設置した。撮影は計測対象である斜面の正面中心を含め、左右15mの等間隔に14箇所から、レンズ歪みの影響を避けるためにカメラを90°ずつ回転して1箇所当たり4枚の画像を撮影した。レンズの焦点距離は50mm、撮影に用いたデジタルカメラは約300万画素であった。解析はセルフキャリブレーション法を用い、さらに一般逆行列を用いることで基準点を設定することなく計測点の3次元座標を求め、その後4ヵ月後に同じ撮影を行い、2回の解析結果より各計測点の変位を算出した。その際、ターゲット3個を水平方向に50mm移動させ、画像計測の計測精度を検証できるようにした。

Second Order Design

- ・ Costから見た精度の関係を考える問題

低画素数のカメラで多数枚の撮影



150～300万画素のカメラ
(数10万円以下)

どちらが精度と
Cost的に有利か？

高画素数のカメラで少ない枚数の撮影

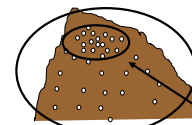


350～1000万画素のカメラ
(50～60万円程度)

図-2 セカンドオーダーデザイン問題の概念

Third Order Design

大きな領域をまず測って、小さな領域を再度測る手法を具現化する方法



発見すべき変位の大きさを
あらかじめ考慮に入れておく

広角レンズで広範囲を計測する

長焦点レンズで重点的に計測する

図-3 サードオーダーデザイン問題の概念

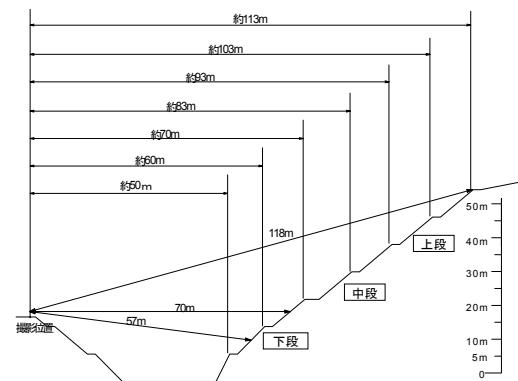


図-4 計測対象法面と撮影位置の概念図

変位の算出に当たっては、次のような解析法を用いた。まず最初の計測値 x_i と4ヵ月後の計測値 y_i からなる図形の重心 x_g および y_g をそれぞれ式(5)のように表す。ただし、計測値の数を n とする。

$$x_g = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n, \quad y_g = \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) / n \quad (5)$$

次にこの値を原点とする座標値を設定する。計測値

$\mathbf{x}_i$ と計測値 $\mathbf{y}_i$ はそれぞれ式(6)のように表わされる.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_g, \quad \mathbf{y}_i = \mathbf{y}_i - \mathbf{y}_g \quad (6)$$

式(7)による座標軸の長さの比を算出し、それを掛け合わせることで、各計測値の長さを同一とすると同時に重心を重ね合わせる.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{y}_i \times \sqrt{\left(\sum \|\mathbf{x}_i\|^2 / \sum \|\mathbf{y}_i\|^2 \right)} \quad (7)$$

次に回転行列 R を掛けることで座標軸を一致させた際の残差を $\mathbf{v}_i$ とすると式(8)のようになる.

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i - R \times \mathbf{y}_i \quad (8)$$

この残差の2乗和が最小になるような回転行列 R を求める. これは式(9)より $\sum \mathbf{x}_i^T R \mathbf{y}_i$ を最大にすればよく、式(10)のように求めることができる.

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i = \sum \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i - 2 \sum \mathbf{x}_i^T R \mathbf{y}_i + \sum \mathbf{y}_i^T \mathbf{y}_i \quad (9)$$

$$\sum \mathbf{x}_i^T R \mathbf{y}_i = \text{trace} \left(\left(\sum \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i^T \right) R^T \right) = \text{trace} \left(V^T R^T U S \right) \quad (10)$$

$$\rightarrow \max, \quad \therefore V^T R^T U = I$$

ただし、 $\sum \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i^T = U S V^T$ と直交行列 U, V^T と特異値 S を用いた特異値分解の結果を用いた.

図-5は2回の計測から各ターゲットの水平方向の変位を求めたもので、13,14および22が移動させたターゲットである. また図の上の結果は14方向から撮影した画像を用いたもので、下の結果は7方向から撮影した画像を用いたものである. なお、当法面全体に計測期間中に変位は生じておらず、移動させたターゲット以外の箇所の変位は光測距儀にて発生していないことを確認している. 図に示す計測結果より、道路法面に対向する道路からであってもより数多くの画像を使うことで計測精度は向上し、また基準点を固定しないフリーネット網解法で計測点座標を求め、最終的に各計測時の座標軸を全計測点を一致させるように重ね合わせることで、各計測点の変位を算出することが可能であった.

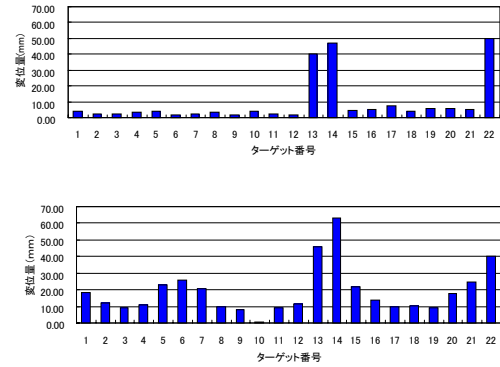


図-5 法面の変位計測結果

5. 結 言

デジタルカメラで撮影した画像から斜面の変位を計測するためには、次の手法が適すると考える.

- ・ 解析はフリーネット網で解き、各計測値の経時変化を重ね合わせる手法を工夫することにより変位を求める. これにより基準点無しの計測が可能になり、ゼロオーダーデザイン問題の解決を図る.
- ・ 撮影位置が限定されても画像枚数を増やすことでファーストおよびセカンドオーダーデザイン問題を解決することを試みる.

この他残りの課題に関しては、さらに研究を続けていく予定である.

参考文献

- 1) 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫, 緒方健治, 松山裕幸: 精密写真測量技術の斜面監視システムへの適用に関する研究, 土木学会論文集, No.771/III-68, pp.187-197, 2004.
- 2) 三浦悟: 土木計測分野におけるデジタル写真測量の高度化に関する研究, 京都大学大学院博士論文, pp.130-225, 2005.

STUDY ON ROCK SLOPE MONITORING METHOD USING DIGITAL IMAGES

Satoshi NISHIYAMA, Yuzo OHNISHI, Takao YANO, Kiyoyuki AMANO and
Osamu MURAKAMI

This paper reports on a study the technology to monitor the behavior of a slope. Various monitoring methods have been developed, but a precise photogrammetry is one of the best methods in order to monitor the displacements of a slope with easy procedure because this method can measure the displacements of a slope are analysed with high precision and accuracy by using a number od images taken from various locations. In this study, what probelems the photogrammetry includes for monitoring a slope is introduced, and the precision and accuracy of the measurement values obtained by the proposed technology is verified and its applicatoin to slope monitoring is examined.