

精密写真測量を用いた斜面変位計測に関する研究

(株)奥村組	正会員	○瀧本和宏
京都大学大学院	正会員	大西有三
京都大学大学院	正会員	西山 哲
京都大学大学院	正会員	矢野隆夫

1. はじめに

豊浜トンネル坑口における、岩盤崩落事故以降、社会の斜面防災に対する関心が高まっている。日本では地質上、気候上の特徴などから斜面の安定性に問題がある箇所が多数存在する。そこで、危険な斜面の崩壊を予測するためにはその変位計測が重要な役割を果たす。

これまで、斜面に対する変位計測手法が開発されてきた。しかし、計測機器が高価であることや、それら機器自体のメンテナンスが困難なことから斜面に対するモニタリング実績は数少ない。

今回の斜面変位計測には精密写真測量を用いるが、それには以下のような利点が挙げられる。1 つ目は、現場での作業が写真撮影のみであることの簡便さである。2 つめはデジタルカメラを用いることでリアルタイムな変位計測が可能であるということである。最後には、ターゲットを計測対象物に密に貼り付けることによって、広範囲の斜面における3次元の変位計測が可能であるということである。

これらは、これまでの計測手法には見られない特徴であって、精密写真測量が斜面の変位計測には最適であると考えられる。本研究では、精密写真測量を日常監視のツールとして用いる際の問題点を指摘し、実験によりその解決を試みる。

2. 解析理論

精密写真測量とは、まず対象物に反射ターゲットを貼り付け、複数の地点からカメラの向きを変えながら撮影を行う。次にターゲットの画像の2次元座標から、ターゲットの3次元座標を逆算する。これが大まかな流れである。

図1はレンズの中心とターゲット像とターゲットの位置関係を示したものである。これらの3点は一直線上にあって、その直線は共線と呼ばれている。

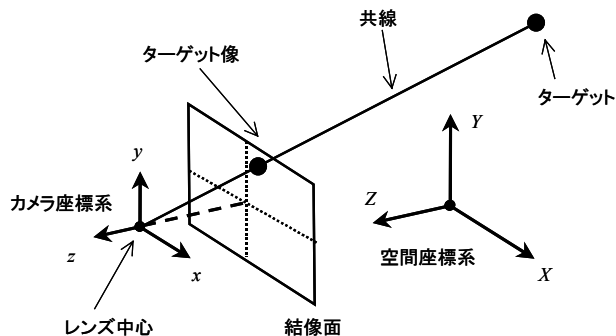


図1 共線条件

そして、写真 j に写るターゲット i に関する共線式を示した。ここで、 m は空間座標系とカメラ座標系とを関連付ける回転行列の要素である。

$$f_{xij} \equiv -\Delta x_{ij} - c \frac{m_{11j}(X_i - X_{0j}) + m_{12j}(Y_i - Y_{0j}) + m_{13j}(Z_i - Z_{0j})}{m_{31j}(X_i - X_{0j}) + m_{32j}(Y_i - Y_{0j}) + m_{33j}(Z_i - Z_{0j})} = x_{ij}$$

$$f_{yij} \equiv -\Delta y_{ij} - c \frac{m_{21j}(X_i - X_{0j}) + m_{22j}(Y_i - Y_{0j}) + m_{23j}(Z_i - Z_{0j})}{m_{31j}(X_i - X_{0j}) + m_{32j}(Y_i - Y_{0j}) + m_{33j}(Z_i - Z_{0j})} = y_{ij}$$

これを線形化し、観測方程式 $\mathbf{v} = \mathbf{e} - \mathbf{A}\mathbf{x}$ を得る。さらに、この式に最小二乗法を適用すると、よく知られた正規方程式 $\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{e}$ が得られる。

さて、一般に画像計測においてその観測方程式の係数行列 $\mathbf{A}$ には、ランク落ちが存在するために正規方程式は一意解を持たない。そこで、今回はターゲットの3次元座標推定値の分散が最小になるような拘束条件を次のように与えた。

$$G = \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & Z_i & -Y_i & X_i \\ 0 & 1 & 0 & -Z_i & 0 & X_i & Y_i \\ 0 & 0 & 1 & Y_i & -X_i & 0 & Z_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}$$

この $G = (\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_7)$ は、座標の並進(3)回転(3)縮尺(1)を固定し、かつ最小ノルム解を与える。この拘束条件を用いれば、推定値の分散最小解を得ることができる。

キーワード：斜面モニタリング、変位計測、日常監視、精密写真測量

連絡先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻ジオフロント環境工学講座

3. 現場実験概要



図 2 計測現場概要写真

今回の実験に用いた現場は、台湾南部を走る南二高 380.7KP 付近の北行き車線路肩にある斜面である。この現場は、コンクリートの法枠工が施工されているが、その後もせり出しが見られる。

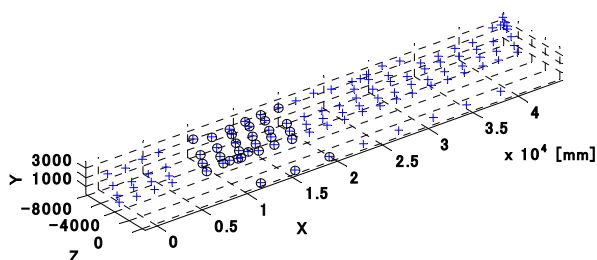


図 3 ターゲット配置図

図 3 は斜面に設置したターゲットの配置図である。黒丸を付けたターゲットは、後で述べるように、“block1”の解析対象区域である。ターゲットは 1 列に 4 段、23 列にわたって設置し、斜面手前のガードレールにもターゲットを 8 個設置した。さらに、今回は計測の間隔を短かったため、擬似的な変位を作り出すことにした。移動式ターゲットを斜面の傾斜方向に動くもの、斜面に垂直な方向に動くもの、水平方向に動くものの 3 種類を 2 個ずつ合計 6 個設置し、移動ターゲットの移動量をノギスで計測した。その結果を以下の表に示す。

表 1 ターゲット移動量のノギス計測値[mm]

ターゲットNo.	1	2	3	4	5	6
1 回目	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	31.50
2 回目	51.55	54.30	51.45	51.40	41.80	31.90

今回用いた長大な斜面では、精密写真測量で必要とされる収束撮影ができない場合が多い。今回は日常監視段階での変位計測を目的としているので、斜面沿いに自動車でパトロールしながらの撮影を想定し、カメラを水平に移動させながら、1 箇所あたり 2,3 方向に向けて撮影した。撮影可能範囲はレンズの焦点距離によって異なるので、撮影範囲の 30 パーセントを重ね合わせながら斜面全体をカバーした。また、1 方向あたりカメラを光軸に関

して 90 度ずつ回転させ、1 方向あたり 4 枚の写真を撮影している。

以上の撮影を 1 クールとして、レンズを 18mm, 28mm, 35mm と変えて移動式ターゲットの移動前後に合計 6 クールの撮影を行った。

4. まとめ

解析結果を図 5 に示した。横軸の“condition”の項目に関して説明する。1 段目はカメラの光軸に関する回転による条件であって、“all”とは撮影方向 1 方向あたり 4 枚使用した解析であり、“0”とはカメラの回転がない状態の写真のみを使用した解析である。2 段目は解析対象区域に関する条件であって、“all”とは全ターゲットを使用して行った解析を、“block1”とは図 3 において丸印をつけたターゲットのみを対象に行った解析である。本論文では、“block1”を対象にした解析の結果に関してのみ紹介する。3 段目の各数字はレンズの焦点距離を表わしている。また、グラフの“precision”は内的誤差を、“accuracy”は外的誤差を表わしている。

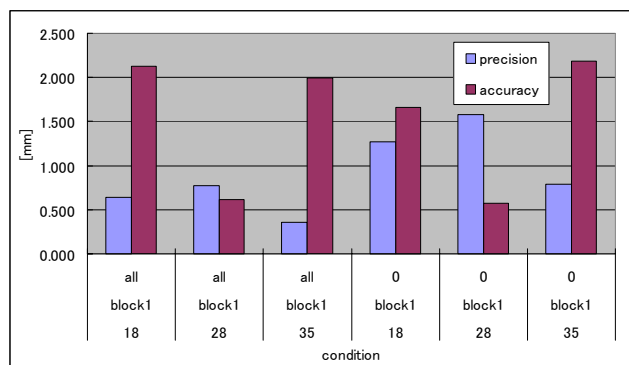


図 4 外的精度と内的精度の比較

図 4 より、外的精度と内的精度の相関はないということが言える。また、カメラを回転させて撮影すれば、内的精度が向上することが分かる。これは、ターゲットを CCD の様々な箇所で捕らえることによりレンズ歪みの影響が打ち消されるからであると考えられる。また、内的精度に関してはどのレンズを使用してもほとんど変化がないことから、広角レンズでカメラを回転させながら撮影するのが実務面を考えた場合有利であると言える。

参考文献

瀧本和宏, 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 西山哲: 精密写真測量を用いた斜面モニタリングに関する研究, 平成 14 年度関西支部年次学術講演会講演概要, III-65, 2002