

# デジタルカメラによる斜面変位計測システムの開発

河 野 幸 彦\*  
 有 本 弘 孝\*\*  
 小 野 徹\*\*\*

**概 要** 高精度画像マッチング処理を用いた変位計測手法を斜面変位計測モニタリングに適用し、自動で画像撮影および変位解析が短時間ででき、簡便で安全・低コストな計測システムの開発を行なった。本システムは、実現場において定期的に斜面の自動撮影を行い、取得した画像をもとに自動処理した経時的な変位を伝送し、遠隔地のパソコンからモニタリング可能とするものである。本稿では、盛土斜面を100 m程度の遠方から観測し、実用的な精度で安定的に計測が行えることを確認したので報告する。

**キーワード**：変位計測，斜面モニタリング，画像計測，デジタルカメラ

## 1. はじめに

地山や盛土などの斜面において、安全性の確保と設備管理のため変位計測が行われているが、現状ではその多くは伸縮計、傾斜計などによる直接計測または水準測量による定期計測によるものである。これらは、計測器設置時の安全性確保が難しく、管理費用も大きくなる傾向がある。計器類を用いた方法で費用が大きくなる要因の一つに、広い斜面において面的な計測を行うために多点の計測が必要となるためである。また、専門の作業員による定期計測が行われている現場では、自動計測への移行も望まれている。

これらの課題の解決方法のひとつに、一度に多点の計測が可能なデジタルカメラ画像を用いた斜面変位計測モニタリングがある。近年では、デジタルカメラの高性能化と精密三次元写真計測技術の進展により、100 m程度離れた位置から撮影しても mm オーダーでの変位モニタリングが可能となってきている<sup>1)</sup>。しかし三次元計測を基盤とする従来手法で高精度な変位計測を実現するには、人工ターゲットの設置が必要であり、崩落危険地や接近が難しい箇所での斜面変位モニタリングへの適用は困難であった。

しかし、高精度画像マッチング手法を用いることで、人工ターゲットだけでなく自然物をターゲット代わりにした変位計測手法が確立されつつある。ただし、その適用例の多くは構造物を対象としたもの<sup>2)</sup>か、斜面を対象としても

短期的な計測事例<sup>3)</sup>であり、自然環境下において長期的に安定した精度で計測を行うための工夫と自動化が課題であり、実斜面において長期的な計測実験を行った研究例<sup>4)</sup>は少ない。

本研究では、デジタルカメラ画像の高精度画像マッチング処理を用いたノンターゲット式の変位計測手法を長期間の斜面変位モニタリングに適用し、自動で撮影・変位解析が可能なシステムの開発を行った。当システムは、現場固定のデジタルカメラにより定期的に斜面の自動撮影を行い、その画像を用いて、現場のパソコンで任意ポイントの経時変位を自動解析するものである。変位解析値や斜面状況写真などは無線でリアルタイムに送信することが可能である。

## 2. 開発システムの概要

### (1) 撮影方法

撮影方法の典型例を図-1に示す。変位モニタリングの対象となる斜面に向けて、斜面から十分離れた位置にカメラを強固に固定して設置し、計測範囲に合わせて焦点距離を設定しピントを合わせ固定する。対象範囲の広さや計測精度によりカメラの台数が複数台となる場合は、図-1のように隣接写真の一部が重複して写るように撮影範囲を調整する。

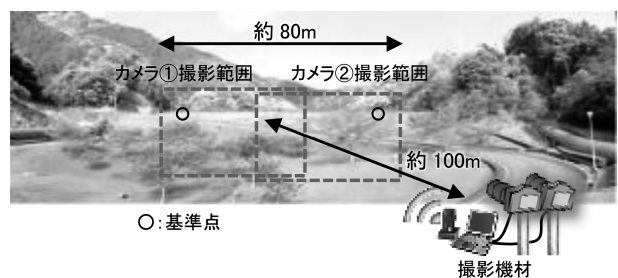


図-1 撮影方法の例



河野 幸彦

有本 弘孝

小野 徹

\* 関西電力(株) 技術研究所 土木技術研究室 会員 kono.yukihiko@d5.kepc.co.jp

\*\* (株)地域地盤環境研究所 調査部 次長 arimoto@geor.co.jp

\*\*\* (株)ズームスケープ 代表取締役 ono@zoomscape.net

(2) 主な作業の流れ

主な作業の流れを図-2に示す。現場作業としては、カメラの設置と設定を行うとともに、レーザー測距機器や写真測量などにより、カメラから計測対象までの距離を測り、カメラの傾斜角も計測する。これらの情報を変位解析用PCに入力して自動解析処理を実行する。

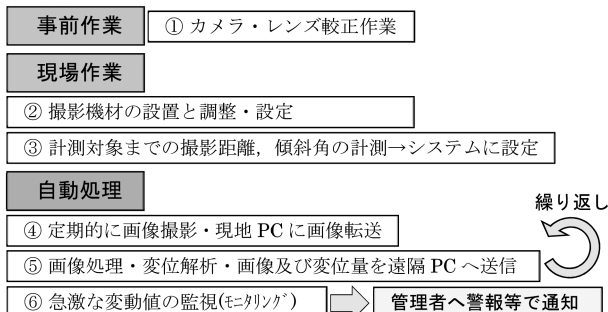


図-2 主な作業の流れ

自動処理は、以下のような流れで行われる。制御装置によりカメラを制御し、一定間隔で複数枚の写真を撮影する。撮影された写真は変位解析用PCに転送され、画像処理と変位解析が行われた後に、遠隔(外部)サーバーに変位データとともに送信される。また、急激な変動や異常の発生をチェックし、それらが発生した場合は管理者に警報等を送る。これらの処理を定期的かつ自動的に繰り返す。

(3) 変位解析の処理過程

変位解析の処理過程は以下のとおりである。

- ① 画像処理により画素単位の変位量を得る
- ② 基準点をもとに撮影角の変化などを補正する
- ③ 画素単位の変位量を実寸単位の変位量に変換する
- ④ 統計処理により異常値除去を行ないグラフ化する

(4) 画像処理による画素単位の変位量算出

本変位計測システムにおいては、最小二乗マッチング<sup>4)</sup>と呼ばれる手法をベースとして独自開発した画像処理手法を用いて画像上での変化を捉え、そのうち平行移動量を画素単位の変位量として出力する。図-3にその方法の概要を示す。まず、①撮影された画像から、事前に設定した複数の計測点・基準点の周辺領域を切り出し、②領域ごとに初期位置の基準となる基準画像と、異なる時刻に撮影された画像(後続画像)とを比較照合して、その差からずれの量を推定する。

実際には、日照変化などによって画像の明るさや影の位置や大きさが変化するので、それらの影響を低減するよう調整しながら変位を求めたり、マッチングの適合度が低い場合は異常値とみなして排除したり、粗い画像により画像全体を合わせてから次第に細部を合わせるようにする、といった工夫をすることで安定的な計測を可能としている。

本画像処理手法の主な特長を以下に示す。

- ・ノンターゲットでありながら、サブピクセル単位の計測が可能であり、ステレオマッチングなどの三次元写真測量手法と比べて高精度
- ・処理が高速(画像1枚あたり数秒以内で処理可能<sup>※</sup>)

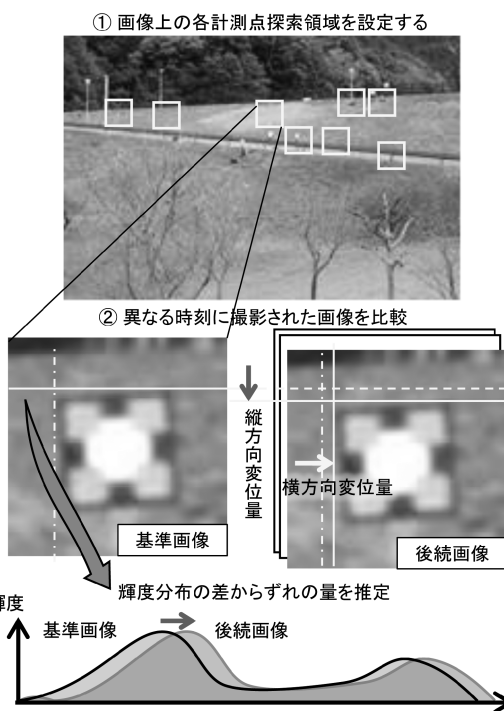


図-3 画像処理による画素単位の変位計測

- ・日照変化や天候の変化にも対応

※計測点数や領域範囲などの設定により処理速度は異なる

(5) 基準点を用いた撮影角補正

長期間のモニタリングでは、カメラを強固に固定していても撮影角が微小に変動する。その変動量を基準点を用いて補正する。撮影角の微小変化と基準点位置の変化の関係を図-4に示す。

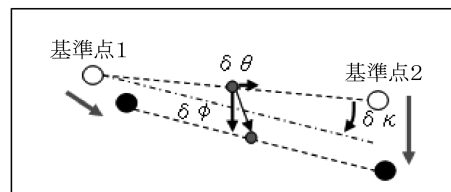


図-4 撮影角の変化と基準点位置の変化の関係

移動前の基準点を○で、移動後の基準点を●で表し、基準点1,2の中間点を小さい丸で表している。基準点1,2の中間点の変位ベクトルのX成分が水平角の微小変動 $\delta\theta$ による影響であり、Y成分が鉛直角の微小変動 $\delta\phi$ による影響である。撮像面上での中間点の変位ベクトルを $(\delta X, \delta Y)$ とすると、

$$\delta\theta = \sin(\delta X/f)^{-1}, \quad \delta\phi = \sin(\delta Y/f)^{-1} \quad (1)$$

として計算できる。また、変動前後の基準点1,2の線分の傾きの変化を光軸まわりの微小変動 $\delta\kappa$ として算出できる。このようにして算出した撮影角の変化を加えたうえで、式(2)を用いて実寸単位の変換を行うことで、カメラに生じた微小な傾きのずれの影響を補正することができる。

実際に行っている処理は、3点以上の基準点に対応し、重複撮影された複数の画像をパノラマ合成して同時調整を

行い、焦点距離の変化にも対応するなど、複雑な処理を行っている。

(6) 画像上の変位から実変位への変換

画像処理により得られた画素単位の変位ベクトル(dx, dy)を実寸単位の変位ベクトル(dX, dY)に変換する。撮影距離をD、鉛直角をφ、水平角をθ、光軸まわりの回転角をκとする(図-5参照)。また、焦点距離をf、センサ素子サイズをsとしたときの変換式を以下に示す。

$$\begin{pmatrix} dX \\ dY \end{pmatrix} = Ds/f \begin{pmatrix} 1/\cos\theta & 0 \\ \tan\phi \tan\theta & 1/\cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa \\ \sin\kappa & \cos\kappa \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} \quad (2)$$

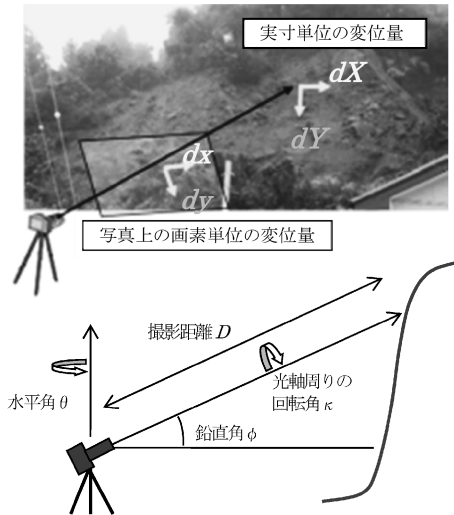


図-5 カメラの撮影角と変位の関係

(7) 統計処理による異常値除去

斜面の変位計測の目的は地盤の変動を捉えることであり、風などによる計測点付近の草木の揺れやたまたま写り込んだ虫の動き、大気ゆらぎなどは排除しなければならない。これらの動きは短時間に変化するという特性があるため、10枚程度の連写撮影を行って、その中で大きな動きがあるものを異常値として除去し、残った画像の変位データを平均することで統計的に計測変位の安定化を図った。

(8) 遠隔監視

集約化された画像と変位データは、処理後直ちにインターネットサーバ上に送られ、遠隔地(オフィス)にあるパソコンから閲覧できるような環境に整備することで、変位データのみでなく最新画像も閲覧が可能で状況確認が容易となる。

3. 現場試験計測

開発したシステムを用いて、以下の実験を行った。

- 実験 I. 模擬供試体を用いた精度検証実験
- 実験 II. 実斜面での個別試験
- 実験 III. 夜間における現場試験
- 実験 IV. 実斜面での自動計測試験

実験 I~III の結果<sup>5)</sup>について以下に要約を記す。

- 実験 I: 計測される変位量は、1画素当たりの解像度(mm/画素)よりも良い精度で計測でき、サブピクセ

ル単位での計測が可能である。なお、1画素当たりの解像度=素子サイズ×撮影距離/焦点距離である。

- 実験 II: 自然環境下においては気象条件(雨・雪)や日照条件(日射・影)などの変化に対応した異常値除去処理を行うことでサブピクセル単位での変位計測が可能であることを確認し、実用的な変位解析精度を有していること。また、計測対象物としては平面的でコントラストが強いものが適する。
- 実験 III: 夜間は影の影響がないので、月明かり程度(照度0.1ルクス)の微小な光でも計測対象物が識別さえできれば十分高い精度で計測できる。

(1) 実斜面での自動計測試験の概要

十分安定した盛土斜面(図-1参照)に対して、約1年間の試験計測を行なった。計測にはデジタルカメラ2台を用い、計測斜面から約100mの遠方にカメラを設置した。斜面の人工ターゲットおよび自然ターゲット(ガードレール等、もともと現地に存在している物体)を自動で撮影・変位解析した後、遠隔地で現地モニタリングができるよう携帯電話網を利用して情報送信し、利用可能者を限定したパソコン上で確認することが可能な仕組みとした。表-1に主要機器の仕様を、図-6に現場試験計測の状況を、図-7に変位計測点としてのターゲットの一部を示す。人工ターゲットは、縦横20cm、厚さ7mmの薄くてコントラストの高い黒白網型ターゲットである。

表-1 主要機器の仕様

| 現場主要機器           | 仕様  |
|------------------|---|
| 撮影<br>デジタルカメラ    | ニコン D7100<br>有効画素数:2,410万画素                     |
| 撮影<br>単焦点レンズ     | ニコン Ai AF Nikkor 50mm f/1.8D<br>焦点距離:50mm       |
| 収録・解析<br>ノートパソコン | DELL Inspiron 14R<br>CPU:Core i5 4200U(Haswell) |
| 転送<br>携帯電話       | NTTドコモ<br>対応周波数(LTE)                            |



図-6 現場試験計測の状況

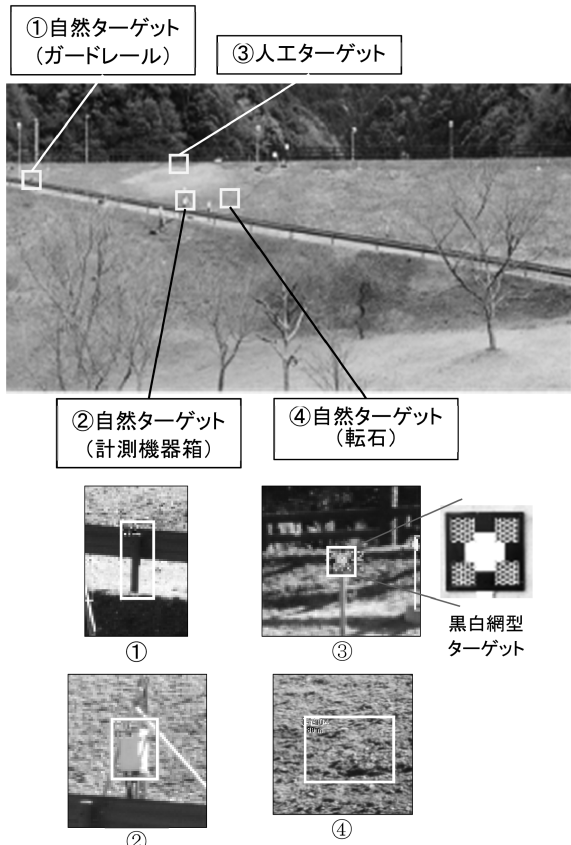


図-7 ターゲットの一部

(2) 計測結果

撮影距離約 100 m の実斜面において、約 1 年間の斜面変位計測(1 時間毎に 1 回10画像)を実施した。計測された変位量の経時変化図の一例を図-8 に示す。まず、基準点の変位した場合にターゲットの計測結果に与える影響を確認するため、基準点そのものに強制的な変位(鉛直約 2 cm)を与えた試験を行った。その結果は図-8 に示すように、ターゲットの計測変位に同程度の値が確認され、想定した計測結果が得られた。

次に、ターゲットそのものに変位が発生(基準点変位を

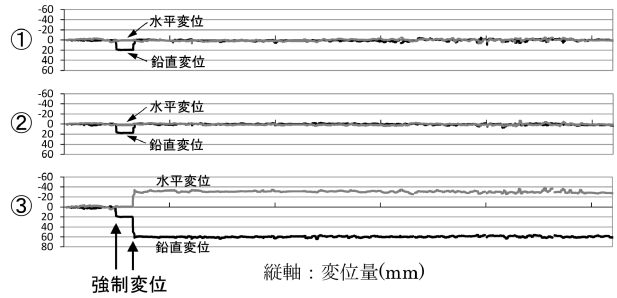


図-8 計測された変位量の経時変化図の一例

基の鉛直位置に戻すと同時に図-8 の③に鉛直約 6 cm、水平約 3 cm を付与した場合を想定した試験を行なった結果、他のターゲット(図-8 の①②)への影響はなく、③のターゲットのみ強制変位と同程度の変化であり、想定どおりの結果が得られた。また、強制変位を与えた以降の経時変化より計測精度を計算すると、標準偏差の全計測点の平均値は 2.0 mm(1 画素当たりの解像度の 1/2 程度)であった。

(3) 装置機能の維持

現地自然環境下に設置している装置は、四季を一通り経過し、1 時間毎に 1 回10画像を自動撮影・解析・転送する過酷な処理をさせている状況で、大きな不具合もなく自動計測ができていることから、良好な機能を維持しているものと考えられる。

4. 現地モニタリング

遠隔地のパソコンによる現地モニタリング画面のイメージを図-9 に示す。現地の計測結果は、遠隔地のパソコン上で、変位データ(数値リストや経時変化図)の履歴および最新撮影画像が Web 上で容易に見られる。ID およびパスワードの設定で、閲覧可能者を制限する環境を整備し、常時監視を可能とさせた。

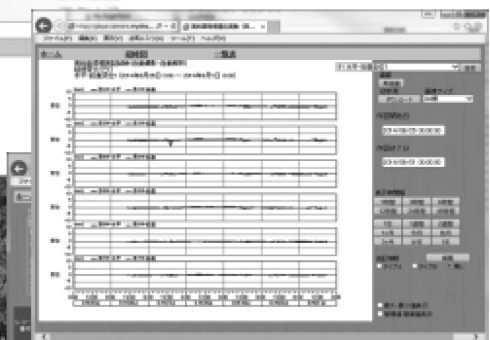
5. おわりに

地山や盛土斜面の面的な変位計測を安全かつ低コストに

ホームページ



経時変化図ページ



数値リストページ

図-9 現地モニタリング画面のイメージ

行う方法として、デジタルカメラを用いた自動変位モニタリングシステムを開発し、その検証を行った。幅約80 mに及ぶ盛土斜面上の多数の計測点を遠方の2台のカメラで約1年間にわたり定期撮影を行ない、自動計測による安定した変位計測が可能であることを確認した。精度評価においては、積雪などターゲットそのものが視界から消えた場合を除き、人工ターゲットやガードレールのような明瞭な対象において、100 m程度の距離から2.0 mm程度の精度の計測結果が得られた。

#### 参 考 文 献

- 1) 西山哲・大西有三・大津宏康・矢野隆夫・龍明治・李徳河：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, 2004.
- 2) 小野徹・若木伸也・澤田純男・高橋良和：耐震構造物の振動実験における高精度動的変位計測，日本写真測量学会学術講演会発表論文集，2013-10号，pp. 93-96, 2013.
- 3) 小野徹・若木伸也：写真計測による雨天時のノンターゲット土砂災害モニタリング，日本写真測量学会学術講演会発表論文集，2013-10号，pp. 89-92, 2013.
- 4) 織田和夫・近藤剛・尾幡昌芳・土居原健：LM法による画像の自動モザイク，写真測量とリモートセンシング，Vol. 37, no. 3, pp. 42-51, 1998.
- 5) 吉田次男・柴田卓詞・藤原正明・小野徹・早川清・若木伸也：デジタルカメラによるノンターゲット式斜面自動変位計測システムの開発，Kansai Geo-Symposium 2015 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集，地盤工学会関西支部，pp. 19-24, 2015.