

# デジタル写真測量の斜面挙動監視への適用に関する研究

吉岡 晃希<sup>1\*</sup>・西山 哲<sup>1</sup>・矢野 隆夫<sup>1</sup>・林 邦彦<sup>2</sup>・藤岡 大輔<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂Cクラスター)

<sup>2</sup>株式会社地層科学研究所 (〒242-0014 神奈川県大和市上和田1794島海ビル2F)

<sup>3</sup>株式会社大林組外環矢切工事事務所 (〒271-0096 千葉県松戸市矢切277-6)

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

斜面の安定問題を評価する上で計測は欠かせないものであり、日常点検・定期点検の段階で実施できる低コストかつ客観的な斜面モニタリング技術が必要である。このような背景を鑑み、デジタル写真測量の斜面モニタリングに適用することを試みた。現状では、デジタル写真測量の計測計画は経験に依存しており、明確な基準や指標がなく、事前に計測精度を推定することができない。そのため、写真枚数を多く設定して計測を行っており、撮影位置と精度の関係も完全には把握されていないのが実情である。そこで計測段階で計測精度を推定できるシミュレーターを導入して、最適な撮影ネットワークの構築を目指した。また、これを現場に適用し、より簡便性の高い効率的な計測システムの確立が可能かどうかを検討した。

*Key Words : digital photogrammetry, monitoring system, slope disasters, landslide*

## 1. 研究の背景と目的

わが国は、国土の広範囲に渡り、斜面災害に見舞われやすい状況にある。1996年に全国で実施された「平成8年道路防災総点検」によると、わが国において、斜面の安定性が不安視され、早期に対策を行う必要のある箇所が56700ヶ所、日常点検・定期点検により監視する必要のある監視強化箇所が145500ヶ所も存在し、危険な道路斜面は膨大な数となっている。しかし、技術的な問題、財源の制約等から、これらの斜面全てに対して管理者が十分な対策を講じる、あるいは管理・点検を行うことは難しい。こういった環境下で、今後さらに老朽化が予想される道路斜面・のり面に対して限られた予算範囲内で効率的に保守・維持管理を行っていくためには、日常点検・定期点検の段階で実施できる低コストかつ客観的な変状計測技術の確立が欠かせない。例えば、プリズム式反射鏡を標点に設ける光波測距や、目視視準による三角測量などがあるが、機器の設置や取り扱いに熟練を要し、計測にかかる人的・時間的コストも膨大になるため、日常点検・定期点検にはなり難いのが実際のところである。

このような背景を鑑み、本研究では、デジタル写真測量の斜面モニタリングへの適用を試みた。デジタル写真

測量の特徴は、対象物の寸法・形状を容易に高精度で計測できることであり、特に多数の計測点を同時に迅速に計測することができるという強みがある。しかしながら、工業計測で発展してきたデジタル写真測量を斜面モニタリングに適用する際には、工業計測と比べて計測条件（計測対象のサイズ、撮影場所の制限、作業効率の問題、基準点の有無など）が大きく異なるため、さまざまな改良が必要となる。撮影条件によって計測精度は大きく左右されるが、計測計画は経験に依存しており、事前に計測精度を推定することはできない。現状では撮影枚数を多くして精度を確保しているが、これでは解析作業に手間がかかり、簡便な計測となるには不十分である。このような課題を克服するために、本研究ではシミュレーターを導入し、計測計画段階でどこから何枚撮影すれば目標とする精度を得られるかを推定できるシステムを構築し、計測計画の標準化を行った。また、シミュレーターを用いて計測条件の最適化を目指し、撮影位置を選定する際の指標としてネットワーク強度という定数を用いることで、計測条件を決定する手法を提案した。さらに、それらの条件を勘案した実斜面での計測を試み、シミュレーターを用いることで、より効率的で高精度な計測手法の構築を目指した。

## 2. デジタル写真測量による計測

### (1) デジタル写真測量の基本原則

デジタル写真測量は写真上の二次元座標 $(x,y)$ から、カメラの撮影位置 $(X_0, Y_0, Z_0)$ と姿勢 $(\theta, \phi, \kappa)$ および計測点三次元座標 $(X, Y, Z)$ を算出する測量手法である。デジタル写真計測の基礎理論<sup>1)</sup>は、カメラレンズの中央と写真上に写った対象点、そして実際の対象点が一直線上にあるという条件、共線条件式である。複数の写真、全対象点において共線条件式をたてたのち初期値の周りでテーラー展開により線形化し、連立方程式を作ったのち繰り返し最小二乗法を用いて解を算出する。

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

ここで、 $c$ はレンズ焦点距離、 $m_{ij}$ はカメラ回転列、 $\Delta x, \Delta y$ はレンズひずみ補正項である。原理を図-1に示す。

### (2) シミュレーター

実際に現地で撮影して解析結果を得るまでは要求される精度を満たすような撮影条件を立案できているかどうかは全く判断できない。そこで、シミュレーターを導入し、計画段階で任意に撮影条件を設定して、精度を事前に推定できるようにした。シミュレーターでは、任意に設定した外部標定要素とターゲット三次元座標をそれぞれ初期値として、ダミー画像と呼ばれる背景に何も写っていないビットマップ画像にターゲットを後方投影で生成する。この操作により任意に設定した外部標定要素で規定される位置から計測対象を撮影した画像を取得することができる。以降は通常のデジタル写真測量と同様にバンドル調整計算を行って、精度を求めることができる<sup>2)</sup>。

デジタル写真測量を用い、どれほどの精度で計測できたかを表す指標として、内的精度があり、経験的に次式のように定義される。

$$\sigma_{xyz} = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot \frac{d}{c} \cdot \hat{\sigma}_0 \quad (2)$$

ここで、 $q$ はネットワーク強度、 $k$ は写真枚数、 $d$ はカメラから対象物までの概略距離（撮影距離）、 $c$ はレンズの焦点距離、 $\hat{\sigma}_0$ はCCD面上での計測誤差（読取精度）である。ネットワークの概念図を図-2に示す。

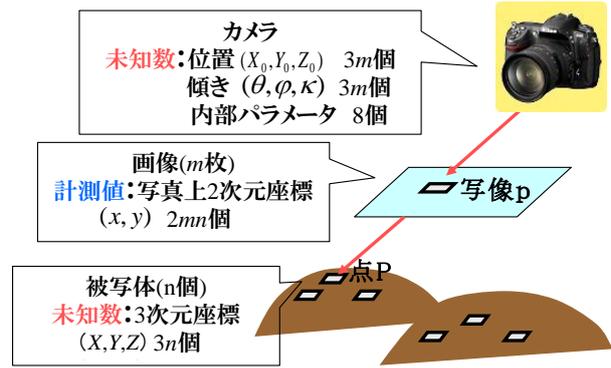


図-1 デジタル写真測量の原理

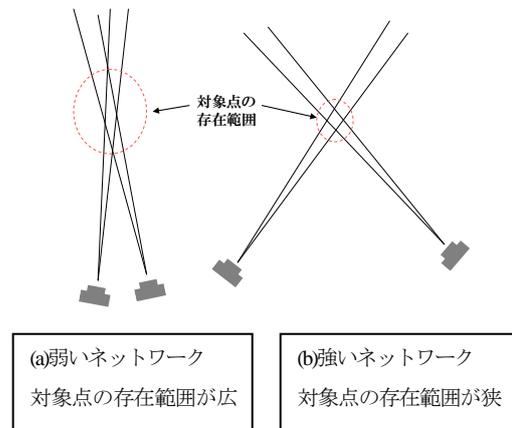


図-2 撮影ネットワークの概念図

## 3. 高速道路のり面における現場計測

デジタル写真測量におけるシミュレーターの適用を実斜面に対して行う。今回用いる現場では、継続的にデジタル写真測量による斜面モニタリングが行われている。現場斜面の概観を図-3に示す。のり面に設置されたターゲットは約100mの範囲に基準尺用のターゲットを含めて78個であり、広範囲に及ぶため、一枚の写真に全てのターゲットを写し込むことはできない。したがって、対象斜面を3つのブロックに分けて撮影を行い、ここではブロック2についての解析と結果を示す。今回の計測では本研究で得られた知見を参考にして、従来の撮影位置と異なる撮影位置で計測を行い、より効率の良い計測を試みた。従来の撮影条件では、撮影角度は $127^\circ$ 、平均撮影距離は110m、撮影位置は12ヶ所（高低差なし）、撮影枚数は24枚であったが、今回の計測ではそれぞれ $88^\circ$ 、78m、9ヶ所（高低差あり）、18枚にした。使用カメラは、Kodak Pro 14n（1300万画素）、レンズは長焦点距離レンズの50mmを用いた。

撮影位置とターゲットの関係を図-4 に示す。作業を省力化しつつ従来と同等あるいはそれ以上の精度を得ることが目的であるため、事前にシミュレーターを行い、予想される精度はどれぐらいなのかを調べた。新たに設定した撮影条件で、ノイズ 0.2pixel のシミュレーターを行ったところ、読取精度は 0.116pixel、内的精度は 1.352mm となり、これらは従来の計測結果よりも良いものであった。

また、ネットワーク強度に関しても、従来の計測の場合は計測結果からネットワーク強度を求めると  $q=1.126$  であり、新たに設定した条件でシミュレーターを行った場合は  $q=1.323$  であることから、ネットワーク強度の落ち込みもなく、適切なネットワーク強度である 1.5 以下に収まっている。したがって、新たに設定した撮影条件で計測を行うことは適切であると判断し、現場での計測を行った<sup>3)</sup>。計測結果を表-1 に示す。

今回行った計測で得られた内的精度  $\sigma_{xyz}$  は 1.376mm、読取精度は 0.121pixel であり、これは事前にシミュレーターで得られた 1.352mm、0.116pixel とほぼ同じ値をとっており、シミュレーターで計測計画を行うことは有効であった。ネットワーク強度も従来と同等の値をとっており、少ない撮影枚数、撮影位置でも適切なネットワークを形成できている。精度の各項目を従来の計測と比べてみると、いずれの項目も従来の計測よりも向上していることが分かる。写真枚数、撮影位置数を従来の計測よりも減らしたにもかかわらず精度が向上していることから、撮影位置の選定が計測に与える影響が大きい重要な要素であるといえ、シミュレーターを用いたことが有効であったと考えられる<sup>4)</sup>。特に、z 軸方向の変位（手前方向への崩落など）を検知するのに重要な  $\sigma_z$  は、過去行われてきた計測では他の軸方向に比べて低下するのが通例であり、精度が良いケースでも 2mm 程度までのものしか得られず、z 軸方向の精度を向上させるのは課題であった<sup>4)</sup>。今回の現場斜面の計測においても従来の計測では  $\sigma_z$  は 2.013mm ある。しかし、今回の計測では、高低差をつけた撮影位置をとることによって  $\sigma_z$  は 1.492mm まで向上しており、他の軸方向の内的精度と遜色のない精度が得られた。このことから、高低差をつけた撮影位置をとることは有効であるといえる<sup>5)</sup>。

表-1 各計測の解析結果

	従来の計測	今回の計測	
読取精度(pixel)	0.134	0.121	
内的精度(mm)	$\sigma_x$	1.946	1.459
	$\sigma_y$	1.700	1.153
	$\sigma_z$	2.013	1.492
	$\sigma_{xyz}$	1.891	1.376
ネットワーク強度 $q$	1.126	1.293	



図-3 K地区現場斜面概観

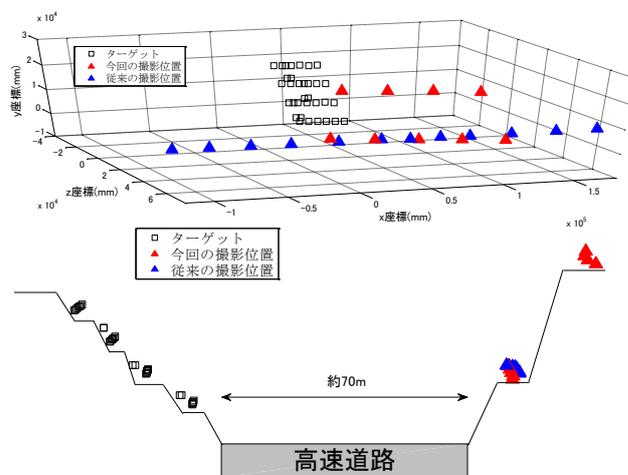


図-4 撮影位置とターゲットの関係

#### 4. まとめ

シミュレーターの確立により、デジタル写真測量による斜面モニタリングにおける課題であった計測計画に客観性をもたせることが可能になった。計測精度には写真枚数、撮影位置、計測に用いる機材などの撮影条件を任意に変化させて計測条件を検討できるようになり、得られる計測精度を推定できる。

継続的にデジタル写真測量による計測が行われている実斜面において、シミュレーターを適用し、本研究で検証した最適な計測条件を考慮に入れながら、新たな撮影ネットワークを構築した。その結果、従来よりも少ない写真枚数、撮影位置でも精度は向上し、課題であった z 軸方向の精度を向上させることもでき、より精密な変位検知が可能となったと考えられる。シミュレーターによって事前に得られる精度を推定して撮影条件を決定し、従来よりも作業を省力化しても良い精度、撮影ネットワークを得られたので、結果として、デジタル写真測量による斜面モニタリングの効率化を実現できた。

## 参考文献

- 1) 長野洋平, 大西有三, 西山哲, 大窪克己, 浜崎智洋: 斜面モニタリングへの精密写真測量の適用, 土木学会年次学術講演概要集第3部, Vol.61, 2006.
- 2) 金川真二, 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫, 龍明治: 先験情報を用いて高度化した精密写真測量システムによる斜面動態観測, 土木学会関西支部年次学術講演概要集第3部, 2009.
- 3) 藤岡大輔, 大西有三, 西山哲: リアルタイム被害査定におけるデジタル写真計測の適用に関する研究, 土木学会年次学術講演概要集共通セッション, Vol.63, 2010.
- 4) 西山哲, 大西有三, 矢野隆夫, 龍明治: 岩盤斜面の画像計測モニタリング手法の研究, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2008.
- 5) 吉岡晃希, 西山哲, 矢野隆夫, 村上治: デジタル写真測量の斜面監視システムへの適用に関する研究, 土砂災害に関するシンポジウム, 2010.

## STUDY ON APPLICATION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY TO MONITORING OF SLOPE

Koki YOSHIOKA, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO, Kunihiko HAYASHI  
and Daisuke FUJIOKA

In many Asian regions, there have been a lot of landslides and the slope stability problem has become social interest. To prevent slope disasters in advance, it is necessary to develop a measuring monitoring method of slope displacement. This paper presents the development of the method which monitors slope behavior using digital photogrammetry. Digital photogrammetry makes it possible to obtain precise three-dimensional measurement of slope using many images taken from various places in a short time at low cost. In this study, we explain the way to obtain the three-dimensional coordinates of measuring points by digital photogrammetry and perform simulation and experiments in the actual slope.