

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

STUDY ON APPLICATION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY TO SLOPE MONITORING SYSTEM

吉岡 晃希¹・西山 哲¹・矢野 隆夫¹・村上 治²

Yoshioka Koki, Nishiyama Satoshi, Yano Takao and Murakami Osamu

¹ 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

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

² つくばソフトウェアエンジニアリング株式会社 (〒101-0041 東京都千代田区神田須田町 2-6-1)

Key Words: digital photogrammetry, monitoring system, slope

1. 研究の背景と目的

我が国は、地盤の隆起と活発な火山活動により、国土の約7割が急峻な山地で形成されている。そのため、経済圏を結ぶ輸送手段としての道路は、自然斜面あるいは切土のり面等に隣接して建設されている場合が多い。道路は重要な社会資本であり、ひとたびその機能が失われると、周辺地域における経済的損失は計りしれないものとなる。さらに、日本はその地質的な条件だけでなく、斜面崩壊の誘因となる地震や台風、大雨といった気象条件も抱えており、斜面崩壊や地すべりといった災害に見舞われやすい環境にあるため、道路利用者の安全を確保する「道路防災」に対する要求は大きく、その重要性も非常に高い。実際に、1996年に全国で実施された「平成8年道路防災点検」の結果によれば、我が国において斜面の安定性が不安視され、早期に対策を図る必要のある箇所が56,700ヶ所、日常点検や定期点検により管理する必要のある監視強化箇所が145,500ヶ所という膨大な数の危険な道路斜面が存在していることが確認されている¹⁾。しかしながら、技術的な問題や予算などの制約から、これらすべてに対し、管理者が十分な対策を講じる、あるいは管理・点検を行うことは困難である。

このような環境のもと、今後更なる老朽化が予想される道路のり面・斜面の維持管理を効果的・効率的に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位計測技術の完備が欠かせない²⁾。従来使用されている技術としては、プリズム式反射鏡を標点に設ける光波測距や、伸縮計などがあるが、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・定期点検に対応した計測になり難いのが実情である^{3),4)}。

本研究は、このような背景を鑑み、デジタル写真測量を利用した斜面監視システムの構築を試みるものである。デジタル写真測量の特徴は、対象物の寸法形状を比較的容易に計測できることであり、特に多数の計測点を迅速に計測することができる強みを有している。しかしながら、デジタル写真測量は工業計測分野で発達してきた技術であり、斜面監視に適用する際には、工業計測と比べて計測条件(計測対象の大きさ、撮影可能場所の制限、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である。そこで、本研究では、統計的検定手法を用いた斜面変位検知法を提案し、基準点が設置できない実斜面での計測において変位検知が可能かどうか検証を行った。

2. デジタル写真測量の原理

デジタル写真測量は、計測点を複数枚の写真に重複して撮影し、計測点がどの写真に写っているか調べ、対象空間軸上の3次元座標を、計測値(観測値)として得られる計測点の画像上の2次元座標から逆解析して算出するものである^{5),6),7)}。その原理を図-1に示す。

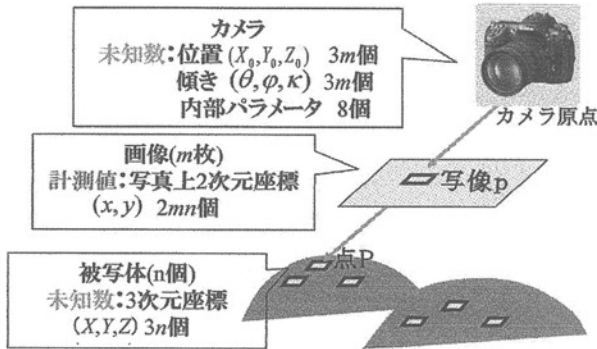


図-1 デジタル写真測量の原理

解析の理論的背景にあるのは、対象に設置されたターゲット(計測点P)とカメラの原点、および写真に写ったターゲット画像pの3つが一つの直線上に存在するという共線条件である。対象空間座標系X-Y-Zから見た点Pの座標を $X=(X, Y, Z)^T$ 、カメラ座標の原点を $X_0=(X_0, Y_0, Z_0)^T$ とする。また、カメラ座標系x-y-zから見た画像pの座標を $x=(x, y, -c)^T$ とし、対象空間座標系X-Y-Zから見た画像pを $X_p=(X_p, Y_p, Z_p)$ とする。この条件から以下の式が導かれる。

$$x = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

このとき、実際には、式(1)の左辺の像の座標の計測値は、レンズひずみなどの使用したカメラが持つ系統誤差の影響を受けるので、その補正値を Δx および Δy であらわして右辺に移項すると、式(2)のように書ける。

$$F_x = x + \Delta x + c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0 \quad (2)$$

$$F_y = y + \Delta y + c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0$$

このように、写真画像上の2次元座標(x, y)それぞれの成分につき共線条件式が一つずつ存在するので、n点のターゲットを計測する場合、2n個の式が存在する。デジタルカメラによりn点のターゲットをm枚の写真に重複して撮影したとすると、共線条件式の総数は2mn個になる。式(2)における未知数の数は、ターゲットの3

次元座標は(X, Y, Z)の3成分あるので3n個、外部評定要素と称される撮影時のカメラの位置と撮影時の角度を表すパラメータ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$)で6m個である。さらに、カメラの構造に起因する内部パラメータは、焦点距離やレンズのひずみを表す係数からなり、カメラの機種に応じて設定するが、本研究においては8個としている。この式を解くことにより未知数を求めるが、式(2)は非線形であるため、各未知数を初期近似値の周りでテーラー展開することにより得られる方程式を行列表現すると次のようになる。

$$v + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 = e \quad (3)$$

ここでAは係数行列で添え字1は外部評定要素、添え字2はカメラ内部パラメータ、添え字3は対象点座標に関する量をあらわしている。また x_1 は各画像の外部評定要素の、 x_2 はカメラ内部パラメータの、 x_3 は対象点座標の補正量ベクトルである。また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、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。この方程式より補正量を求め、それを用いて解を更新し、収束するまで繰り返して計算を行うことにより、計測点の3次元座標が得られる。

3. 画像上の2次元座標計測値および外部標定要素初期近似値の自動取得法

解析計算には、前述したように画像上の2次元座標計測値、外部標定要素近似値および全対象点の3次元座標初期近似値が必要となる。その取得プロセスは³⁾、

- ① 画像上の数点のターゲットについて2次元座標を計測する。
- ② ①で得られた2次元座標をもとに後方交会により、外部標定要素初期近似値を求める。
- ③ これを全画像について行い、全計測点の2次元座標を計測する。
- ④ 3次元座標が未知の点があれば前方交会を行い、初期近似値を求める。

となる。ここで、後方交会は、3次元座標既知の対象点の2次元座標から、その写真の外部標定要素を求めることである。同様に前方交会は、外部標定既知の複数の写真から、対象点の3次元座標初期近似値を求める方法である。

本研究では、画像上の2次元座標計測値および外部標定要素初期近似値の自動取得法の構築を行った。

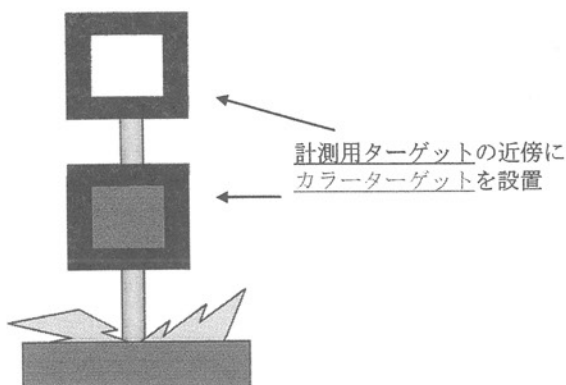


図-2 カラーターゲットの設置例

具体的には、計測点をカラー化し、計測点の番号と色情報を一致させることにより、特定色の計測点を認識する。カラーターゲットの設置例を図-2に示す。

単写真標定を行う場合、後方交会に必要な点数は3点であるが、本研究では、精度の観点から5点以上とした。以下に自動取得のプロセスを示す。

① カラーターゲットの検出

画像を読み込み、特定の色情報を持つ画素を自動検出して画像上からカラーターゲットを特定する。

② 白色ターゲットを探索

①で特定されたカラーターゲットの近傍の計測用ターゲットを探索し、2次元座標を求める。これを5色程度の各色について行うことで、後方交会に必要な3点以上の計測用ターゲットの位置を自動的に求めることができ、さらに後方交会から外部標定要素の初期近似値を取得することができる。

4. 実斜面への適用

ここでは、デジタル写真測量を実際の斜面に適用した結果について記述する。まず、変位検知手法について述べ、その後、実験結果について述べる。

(1) 斜面変位検知法

斜面変位検知法^{8),9)}として、確率統計学における統計的検定手法のうち、平均の差に関する検定を応用した。2つの正規母集団から抽出した標本の標本平均をもとにして、母平均の差についての仮説の検定を行う。

$N(\mu_x, \sigma_x^2)$ に従う母集団から大きさ m の標本を抽出したときの標本平均を \bar{X} 、また $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ に従う母集団から大きさ n の標本を抽出したときの標本平均を \bar{Y} とする。母集団が $N(\mu, \sigma^2)$ の正規分布に従うことがわかっているとき、大きさ n の標本を無作為抽出して、標本平均 $\bar{X} = 1/n(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$ をつくと、 n が大きくなくても、 \bar{X} は $N(\mu, \sigma^2/n)$ に従うので、 \bar{X} は $N(\mu_x, \sigma_x^2/m)$ 、 \bar{Y} は $N(\mu_y, \sigma_y^2/n)$ に従う。正規分布の重ねあわせの性質を使うと、 $\bar{X} - \bar{Y}$ は

$N(\mu_x - \mu_y, \sigma_x^2/m + \sigma_y^2/n)$ に従う。標準化変換をほどこすと、

$$Z = \{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_x - \mu_y)\} / \sqrt{\sigma_x^2/m + \sigma_y^2/n} \quad (4)$$

は $N(0, 1)$ に従うことになる。この結果を用いて、2つの正規母集団の母平均の差について、仮説 $H_0: \mu_x - \mu_y = 0$ の検定を行うことができる。

これを斜面変位検知に適用した場合、各要素は次の物理量と対応付けられる。

\bar{X} : 時期 I における計測点の三次元座標の推定値とする。

\bar{Y} : 時期 II における計測点の三次元座標の推定値とする(重ねあわせにより座標系は時期 I と一致している)。

m, n : 1回の計測で得られた計測値は、計測値の母集団(無限回の計測を行ったと考えたときの計測値全体の集合)から採取された一つの試料(サンプル)であると考えるので1とする。

μ_x, μ_y : 時期 I における母集団の母平均である。この場合、時期 I における計測点の三次元座標の真値にあたる。真値を得ることはできないが、変位が生じていないと仮定した場合、 $\mu_x - \mu_y$ の値は0となる。

σ_x : 時期 I における計測点の標準偏差である。デジタル写真測量では、計測ごとに全計測値の誤差が計算される。これは多数のターゲットを写真に撮り、これに数学モデル(共線条件式)を当てはめるという方式で座標を算出しているからである。デジタル写真測量では共線条件式に対する個々の座標の偏差が計算できる。

σ_y : 時期 II における計測点の標準偏差である。

上記の値は、計測点ごとに得られる値であり、全計測点に対して統計的仮説検定を行うことにより、定量的な評価を持って不動点の判定を行うことができる。

(2) 道路のり面における計測

本実験では、ターゲット数点を人為的に作動させ、そういった危険箇所の抽出が実際に可能であるかどうか検証を行った。図-3に対象のり面の概観を示す。

・計測条件

ターゲットは57点設置し、その大きさは、撮影距離と画像上での像のサイズを考慮して、のり面上部には40cm×40cm、のり面下部には30cm×30cmの白色部を持つようにした。そのうち7点のターゲットは人為的に変位を与えることができる仕組みであり、マイクロメータに

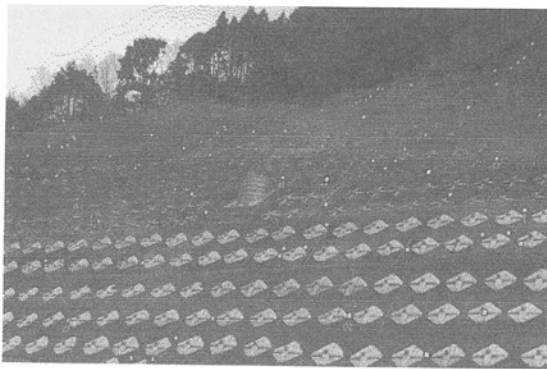


図-3 計測対象のり面

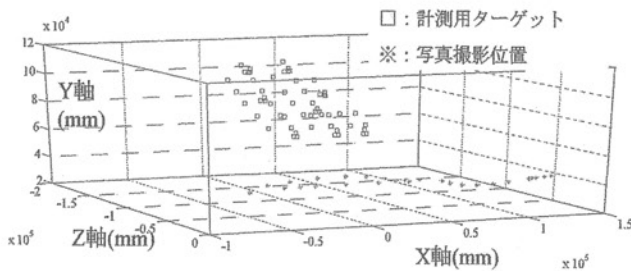


図-4 撮影位置とターゲットの位置

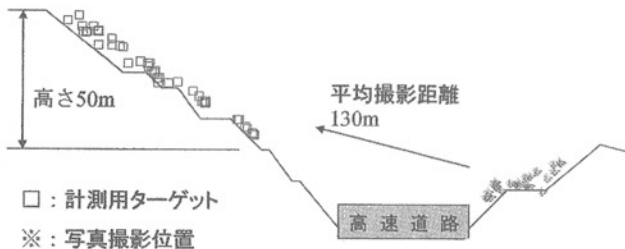


図-5 計測現場の断面図

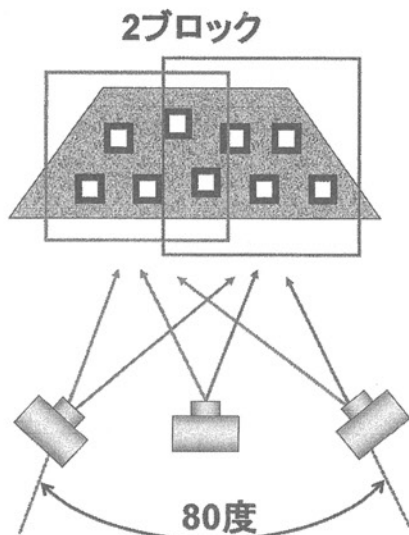


図-6 撮影状況概略図

よる移動量の計測が可能である。また、前章で述べた自動取得法に用いるカラーターゲットも5点設置した。写真撮影は、計測対象の対面に位置するのり面上から行った。その平均撮影距離はおよそ130mであり、撮影位置とターゲットの位置関係を図-4に、断面図を図-5に示す。カメラは600万画素のものを使用し、レンズ歪みを補正するため、対象斜面を2つのブロックに分け、計92枚の画像を撮影した。撮影角度は、既往の研究³⁾より得られた知見をもとに、80度とした。この撮影状況を図-6に示す。計測結果を表-1に示す。

表-1 各計測の内的精度

	1st	2nd
画像面上の計測誤差 (pixel)	0.100	0.096
内的精度(mm)	σ_x	2.107
	σ_y	1.820
	σ_z	2.925
	σ_{xyz}	2.331

1st, 2nd はそれぞれ、人為的な変位を与えた前後の計測を表す。内的精度は2.3mm前後であり、距離精度比に換算すると 1.77×10^{-5} となり、高精度な計測ができたといえる。また画像面上での計測誤差は0.1ピクセル程度であり、1画素の10分の1の精度で計測ができたことがわかる。各回ともほぼ同等の値を示しており、再現性についても高いレベルを有していると考えられる。

解析結果を得るまでに要した時間は、およそ1時間であった。このうち、番号のつけ間違いが無いかの確認といった人的作業時間は40分程度であった。デジタル写真測量における二次元座標計測は、その結果が観測値のすべてであり、解析計算の結果および精度に大きく影響するため、人間によるチェック作業は必要となる。比較のために、手動で解析をおこなった場合、3時間程度の作業時間を要した。このことから、自動取得法を用いることにより、計測のリアルタイム性が向上するとともに、人的負担も削減することができるため、デジタル写真測量をより簡便な手法とすることができた。全画像に対して自動標定を実施した結果、うまくカラーターゲットを認識できなかった画像が6枚あった。これらの画像は共通して、太陽と計測対象、撮影位置との位置関係からハレーションを起こしていたため、認識ができなかったと考えられる。したがって、撮影を行う際には、太陽の位置関係を考慮する、あるいは露出を絞って撮影を行うといった対策が必要であるといえる。

(3) 斜面変位検知法の適用結果

斜面を計測する主な目的はその動態を観測することであり、仮に変位が発生していればそれを適切に検出

する必要があることは前に述べた。3. (1)で説明した手法を用いた変位検出の流れ³⁾を以下に示す。

- ① まず計測点全点を基準点として座標の重ねあわせを行う。全点を用いるのは、まだどの点が不動点であるか不明であるからである。
- ② 得られた結果に対して、全ての点について仮説 H_0 :「変位 $\mu_x - \mu_y = 0$ 」をたてて検定を行い、棄却された点は動点と判断し、それ以外の点を基準点とみなす。
- ③ 更新された不動点を基準点として重ねあわせを行い、その結果に対して統計的仮説検定を行い、新たに不動点となる点を抽出する。
- ④ ③を不動点に変化しなくなるまで繰り返す。
- ⑤ 動点と判断された点に関して、変位の有意性の判定を行う。

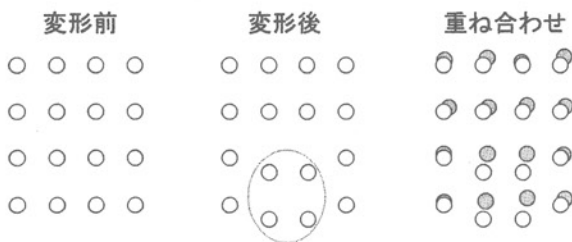


図-7 重ね合わせ

④にあるように、不動点と判断される点に変化しなくなるまで検定を繰り返す必要があるが、ここでは1回目と最終的な結果についてのみ記述する。図-7は重ね合わせの概念図であり、図-8は1回目の検定の結果を示す。

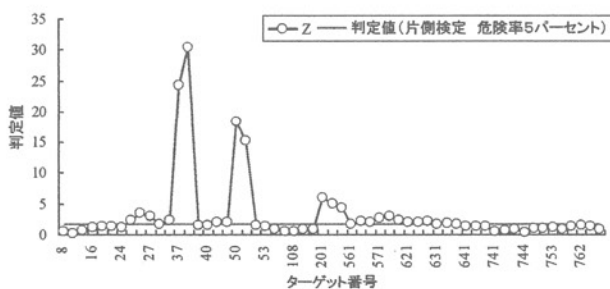


図-8 各点のZ値と判定値 (1回目)

例えば8番のターゲットについて計算すると、

$$\begin{aligned}
 Z &= \{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_x - \mu_y)\} / \sqrt{\sigma_x^2/m + \sigma_y^2/n} \\
 &= (2.197 - 0) / \sqrt{3.606^2/1 + 3.579^2/1} \\
 &= 0.432 \leq 1.645
 \end{aligned}$$

となり、「変位が0であった」という仮説が採択される。た

だし、厳密に言うと、仮説を採択した場合、「変位が0である」という意味ではなく、「変位が0ではないとはいえない」ということになる。同様に37番のターゲットについてZ値を計算すると、

$$\begin{aligned}
 Z &= \{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_x - \mu_y)\} / \sqrt{\sigma_x^2/m + \sigma_y^2/n} \\
 &= (46.535 - 0) / \sqrt{1.366^2/1 + 1.354^2/1} \\
 &= 24.195 \geq 1.645
 \end{aligned}$$

となり仮説は棄却される。つまり「この点は動点である」と判断できる。この「動点と判断された点」以外の点を不動点とみなし、重ねあわせの基準点とする。図-9において、赤色の線は判定値である1.645(標準正規分布の危険率が5パーセントのときの片側検定^{10),11)}を示し、Z値がこの値を超えていれば仮説は棄却され、動点と判断される。50mmの変位を与えた点のZ値は、判定値を大きく超えていた。不動点と見なせる点は、その点におけるZ値が判定値を下回る点であり、57点中32点であった。重ねあわせの精度(基準点と見なした点における変位量の標準偏差)はX軸8.684mm、Y軸9.187mm、Z軸7.423mm、XYZ平均8.464mmとなった。値が非常に大きいのは、大きく変位させた点も基準点として重ねあわせを行っているからである。次の重ねあわせはこの32点を基準点として行う。この作業を数回繰り返し、最終的に得られた結果を図-9に示す。

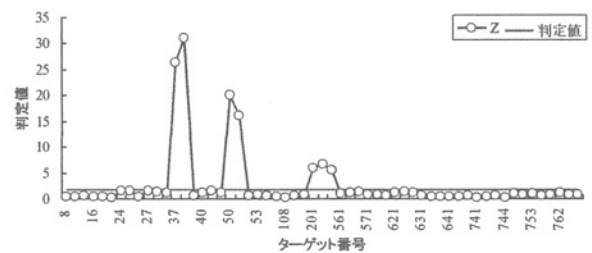


図-9 各点のZ値と判定値 (最終)

重ねあわせの精度はX軸2.190mm、Y軸0.775mm、Z軸1.432mm、XYZ平均1.576mmであった。

図-10は3回目の検定で不動点と見なした点を基準点として重ねあわせを行い、各点の変位量を算出した結果である。オレンジ色に着色している箇所が、3回目の検定で動点と判断された7点である。この結果は、実際に変位させた7点と一致しており、本手法により変位を抽出することができたといえる。

表-2に実際に移動させた量と、デジタル写真測量により計測された変位量を示す。実測値はマイクロメータで計測しており、その精度は±0.1mmである。外的精度は変位の計測値と真の変位値との差のRMS (Root Mean Square: 二乗平均平方根)で表され、計測の正確

性を表す。本実験における外的精度は 1.2mm であり、本手法を用いれば精度よく変位を捉えることが可能であることが実証できた。

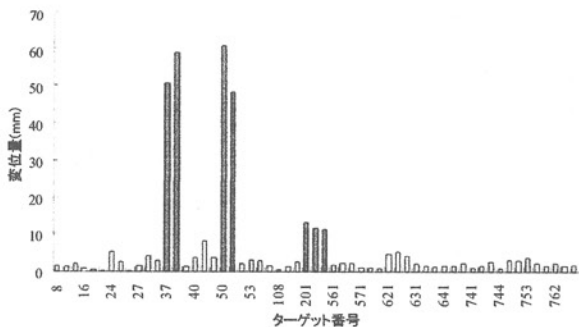


図-10 算出された各点の変位置

次に、人為的に変位をさせていない点について述べる。灰色で着色された点は人為的な移動をさせていない点なので実際の変位置は 0mm であるが、5mm 以上の変位置を示す箇所(24 番, 48 番等)が見られた。しかし、これらの箇所は統計的仮説検定を用いた結果から、「動点」であると判断されていない。式(4)に示したように Z 値は各点の内的精度を用いて計算される。すなわち、得られた変位置が、内的精度から計算される誤差の範囲内であるかどうか検定を行っている。計測結果についてみると、これらの点は草木や集水井の陰になり、十分な画像枚数を確保できておらず、内的精度が低下していたため、誤差と考えられる範囲が広くなり、動点とは判断されなかったと考えられる。

表-2 実測値と計測値との差 (外的精度)

ターゲット番号	X	Y	Z	実測値	デジタル写真測量による計測値	差
201	12.0			12.0	13.2	1.2
202		12.0		12.0	11.7	0.3
203			10.0	10.0	11.3	1.3
37		42.4	30.6	52.3	50.7	1.6
38	51.5		31.0	60.1	58.7	1.4
50		52.2	31.0	60.7	60.6	0.1
51	35.9		30.2	46.9	48.4	1.5
外的精度						1.2

5. まとめ

本研究では、デジタル写真測量の斜面監視システムへの適用を目的として、カラーターゲットを用いた観測値及び初期値自動取得法を利用した変位検知法の構築を試み、本手法の適用性について検証を行った。以下に、本研究から得られた結論をまとめる。

- ・計測精度と撮影における様々な条件との関係を明らかにし、撮影条件が制限される実斜面の計測においても高精度で計測が可能であることがわかった。

- ・観測値及び初期近似値を自動取得することで、計測点数と画像枚数が増えることが予想される斜面

を計測対象とする場合においても、日常・定期点検レベルでの使用に耐える簡便な計測手法を構築することができた。

- ・統計的検定手法を用いることにより、一定の基準を持って実斜面の変位を評価できることがわかった。

参考文献

- 1) 財団法人 道路保全技術センター:道路防災点検要領, 1996.
- 2) 大西有三, 西山哲:岩盤崩落と落石問題に関する現状と課題, 地すべり, Vol.39, No.1, 2002.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 原田健久:測量計算法, 鹿島出版会, 2001.
- 6) 秋本圭一, 服部進:画像計測の基礎, 岡山職業能力開発短期大学校紀要, 第11号, 1997.
- 7) 秋本圭一, 服部進, 井本治孝:デジタル画像計測法を用いた精密工業計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.7, 2001.
- 8) 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.
- 9) 西山哲, 大西有三, 矢野隆夫, 天野滄行, 村上治: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.
- 10) 薩摩順吉:確率・統計, 岩波書店, 1989.
- 11) 北村隆一, 堀智晴:工学のための確率・統計, 2006.

(2010. 5. 14 受付)