

# 写真計測法による斜面などの変位検知と 変位置計測・表示システムの開発



所属名：福山大学工学部  
情報工学科  
発表者：服部 進

## 1. はじめに

高速道路沿いの斜面の変位を写真計測で監視するシステムを開発した。多数のターゲットを現地に設置し、2回の時間のエポックでターゲットを撮影した2つの写真群を比較してターゲットの空間座標に差が生じたかを検定する。すなわち多数の点を同時観測することで計測精度を上げるのである。相対的な点の動きを見ることで絶対基準点や不動点が不要になる。

写真計測を使った斜面の変位検知について、基本的な解析方法についてはすでに報告している。この基礎の上に立って、シミュレータ、ターゲット、検知システムからなる実用的システムを構築した。さらに写真、計測データ、検知結果をWeb経由でデータベース管理できるようにして、観測現場からデータを更新したり参照したりできるシステムを考案した。これはまだ実験的であるが、将来はGISを使った統一的なシステムを構築することを念頭に置いている。

システムは3つのサブシステムで構成されている。観測のシミュレータ、変位検知のプログラム、データの管理プログラムである。本論の内容を示し、その概要を記述する。

2. 観測の基本となる典型的な斜面と観測形態のモデルを示す

3. 調整計算の方法および変位検定の方法を示す。この結果を各エポックでの調整計算プログラムと2回のエポックでの変位検知プログラムに実装した。

4. 検知のシミュレーション法を示す。与えた観測の形態に対してどの程度の検知感度が得られるかを調べる。

5. Web経由でのデータベース管理システムを示す。事務所と現場とをインターネットで結んだシステムを作った。現場で得たデータを直ちにデータベースにアップロードするとともに、過去の時間のエポックで得たデータをダウンロードして比較できる。

6. 実験の結果を報告する。シミュレーションと実測が一致することを示した。

## 2. 斜面と観測のモデル

斜面に対して水平に X 軸，鉛直に Y 軸，手前に Z 軸をとる。観測の網としては道路に沿って下から見上げる方向に一系列に撮影する観測形態を主として考える。

## 3. 観測の網の強さについて

### 3-1 概要

目標とする変位の大きさを検知できる観測の網は，ターゲットとカメラの配置で決まり，観測の網の強さは(1)座標計測の精度，(2) 検知の感度で評価される。理論式を導き調整計算プログラムと変位検知プログラム、およびシミュレータに実装した。

### 3-2 ターゲットの像座標の調整計算とターゲットの座標の精度について

共線条件式を観測式に表した式を

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad : \mathbf{P} \quad (3-1)$$

と表す。  $\mathbf{v}$  は  $(m, 1)$  誤差ベクトル，  $\mathbf{x}$  は  $(n, 1)$  未知パラメータベクトル，  $\mathbf{A}$  は  $(m, n)$  デザイン行列，  $\mathbf{e}$  は  $(m, 1)$  残存量 (discrepancy) ベクトルである。未知パラメータ  $\mathbf{x}$  は外部標定要素，内部標定要素，空間点座標の順に並んでいる。内部標定要素も未知であり自己校正で求める。式(3-1)の右にある  $\mathbf{P}$  は画像座標観測の重み行列である。式(3-1)のデザイン行列は7つのランク落ちをしているので，最小2乗解は空間点座標の平均分散を最小にする拘束を付けて解く。式(3-1)の係数行列の行ベクトルに直交し，さらに互いに直交する7本のベクトル (直交基底行列)  $\mathbf{G}$  をつくり，

$$\mathbf{G}^T = [\mathbf{G}_1^T \ \mathbf{G}_2^T \ \mathbf{G}_3^T] \quad (3-2),$$

$$\mathbf{B}^T = [0 \ 0 \ \mathbf{G}_3^T] \quad (3-3)$$

と書く。添え字 1, 2, 3 は外部標定要素，内部標定要素，空間座標を意味する。式(3-1)の最確値は

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (3-4)$$

で表され，  $\hat{\mathbf{x}}$  の分散共分散行列の推定値は次の式で与えられる。

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_0^2 \left( (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} - \mathbf{G} (\mathbf{G}^T \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \right) \quad (3-5)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \mathbf{v} / (m - n + 7) \quad (3-6)$$

$\hat{\sigma}_0^2$  は単位重みの分散で像座標の計測値の誤差分散から得られる計測精度の事後推定量である。

### 3-3 変位検知の感度の計算

2つの時間のエポック I, II で撮影した2組の写真でターゲットの像座標を求め，それぞれ調整計算してターゲットの空間座標を得る。得られた2組のターゲットの空間座標を1点ずつ重ね合わせて，注目するターゲットに変位がないかを調べる。変位が起きていないという帰無仮説を変位が起きているという対立仮説に対して検定し，変位の大きさが観測誤差のオーダーより大きいとき，帰無仮説を棄却する。以下に仮説検定の基本式を導くが，式の導出は長く掛かるので結論だけを示す。

$k$ 番目のターゲット  $P_k$  がエポック II で

$$\Delta = [A_x \ A_y \ A_z]^T \quad (3-7)$$

の変位をしているとする。点  $P_k$  が変位しているかいないかを判断するには，点  $P_k$  がどの方向にも動いていないという帰無仮説

$$\mathbf{H}_0 : \Delta = \mathbf{0} \quad (3-8)$$

をいずれかの方向に動いたという対立仮説

$$\mathbf{H}_a : \Delta = \hat{\Delta} \neq \mathbf{0} \quad (3-9)$$

に対して検定する。像座標の誤差  $\mathbf{v}$  が平均値 0，分散  $\sigma^2$  に従うとき，帰無仮説 (変位はない) のもとで，検定統計量  $T_x$

$$T_x = (R^2 / r) \sigma^2 \quad (3-10)$$

は自由度  $r=3$  の  $X^2$  分布に従う。 $R$  は全分散  $\Omega$  のうち、空間点  $P_k$  の変位で説明される量である。また対立仮説が正しいと仮定すると、 $T_X$  は非心度  $\delta^2$  の非心  $X^2$  分布、 $X^2(r, \delta^2)$  にしたがう。

もし事前分散  $\sigma_0^2$  が未知であれば、事後分散  $\hat{\sigma}_0^2$  を使うことになる。現場での検定にはこれを使う。

帰無仮説のもとで、検定統計量  $T_F$

$$T_F = \frac{R/r}{\Omega_A / (m - (n+r) + 7)} \quad (3-11)$$

はF分布  $F(r, m - (n+r) + 7)$  に従う。 $\Omega_A$  は全分散  $\Omega$  から  $R$  を除いた量である。一方対立仮説が正しいと仮定すると、 $T_F$  は非心F分布  $F(r, m - (n+r) + 7, \delta^2)$  に従う。 $\delta^2$  は非心度と呼ばれるパラメータである。

#### 4. シミュレータの設計

##### 4-1 シミュレータの計算手順

シミュレータの目的は、最初に検知したい感度を設定して、これを満足する観測形態を見つけることである。シミュレータには斜面の勾配、ターゲットの配置、カメラ、撮影点と撮影方向、座標の計測精度  $\sigma^2$  を与える。図-4.1にシミュレータの画面を示す。するとシミュレータはパラメータの分散共分散行列を計算し、 $1-\alpha=5\%$  の危険度、 $1-\beta=20\%$  の検定力で検知可能量を求める。結果は図-4.2のように得られる。左側の窓が計測の予想精度、右画面はY方向とZ方向に検知可能な変位の大きさである。どちらも横軸は点列である。検知可能量は式(3-10)から第1種、第2種の誤り確率のバランスを取るように決めている。

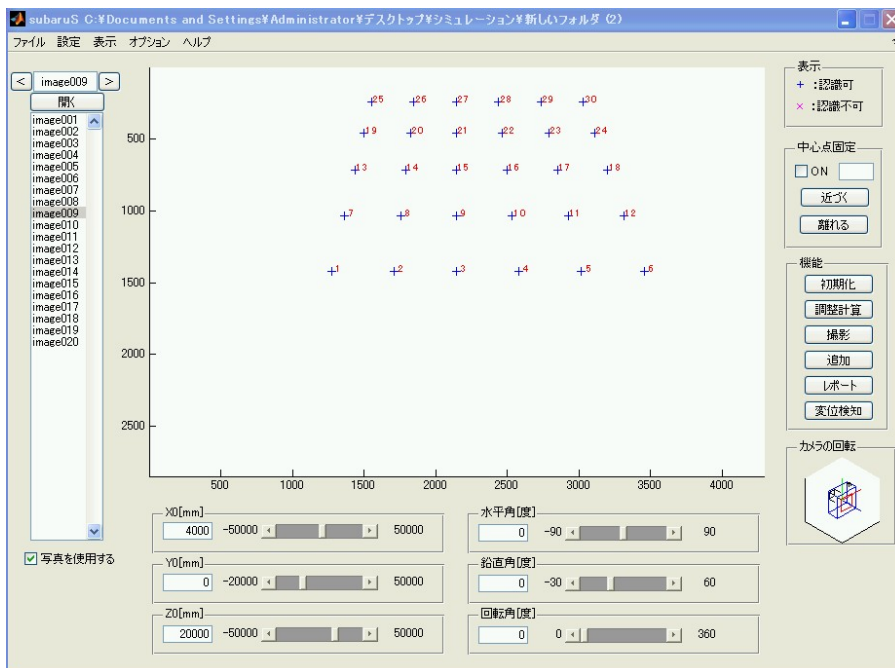


図-4.1 シミュレーションの設定画面

## 5. Webベースのデータ管理システムの構成と機能

現場で撮影した写真と検知結果を、現場からすぐに事務所に転送し、地図をインデックスとするデータベースで管理する。図-5.1 に変位検知のシステムの構成を示した。

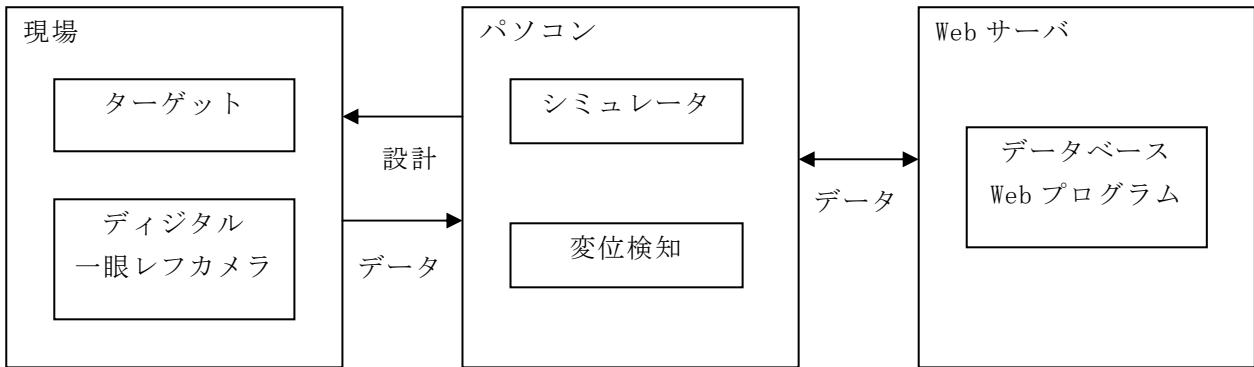


図-5.1 変位検知システムの全体

計測地点のインデックスとして無料の地図サービスである Google Maps 使った。Google MAPS API を使い、撮影座標を地図上に表示し、噴出しにスナップ写真があれば表示できるようにした。表示の例を図-5.2, 図-5.3 に示した。

### 斜面変位検知管理システム

写真番号	点番号	X座標	Y座標	フラグ
1	1	7.2336	1.4673	1
1	2	-5.404	-0.0129	1
1	3	5.1193	1.6227	1
1	4	6.5908	2.1748	1
1	5	2.7247	0.9155	1
1	6	6.2058	0.0648	1
1	7	-4.6033	1.6058	1
1	8	3.7704	-1.0805	1
1	9	-0.0029	2.3215	1
1	10	-4.8585	0.8854	1

座標位置X	34.455465
座標位置Y	133.230319
撮影日時	2009年3月5日
写真データ	DSC_0042.JPG

[写真点データ](#)  
[外部標定要素データ](#)  
[測定点座標データ](#)  
[変位検知結果](#)

図-5.2 各処理画面



図-5.3 撮影場所の表示

## 6. 変位検知のシミュレーションと実測

写真-6.1の小さな斜面(福山大学第2駐車場)を使って、システムの性能を示す。使用したカメラはNikonD90 (3K\*4K画素) 24mmレンズである。事前誤差は1/10画素=0.6 $\mu$ mとしている。横に約2m間隔で6個、縦に約1m間隔で5個、合計30個のターゲットを配置した。これを斜面から約20mの距離で、斜面に沿って5箇所から4枚ずつ合計20枚撮影を行なった



写真-6.1 実験斜面

### 6-1 シミュレーション

まず、シミュレータを使ってどのぐらいの変位が検知できるのかを調べた。この結果20枚の撮影ではターゲットの精度は表-6.1に示すように0.5mmであった。また変位検知の可能量はY方向で1.5mm、Z方向で3.5mm程度であった。

表-6.1 シミュレーションの結果得られた予想精度

全ターゲットの空間座標の精度 (標準偏差) [mm]			
msx	msy	msz	msxyz
0.5744	0.3922	0.5958	0.5287

### 6-2 1回目(エポックI)の撮影処理

全ターゲットにコードを付けているので、番号の読み取りは自動である。ターゲットの空間座標の精度は表のようになった。これによると、シミュレーションよりも実測のほうが約2倍精度がよい。これはターゲットがレトロ(反射型)でないため、シミュレーションでは性能を低く見積もったためである。撮影時間帯による違いはここでは省くが、一般にレトロターゲットに近い性能を出しているため、実用上レトロターゲットでなくとも支障はないものと思われる。

表-6.2 全ターゲットの空間座標精度

全ターゲットの空間座標の精度 (標準偏差) [mm]			
Msx	msy	msz	msxyz
0.2867	0.193	0.2558	0.2482

### 6-3 2回目(エポックII)の撮影処理

変位を検知するために、ターゲットの1つ(下から2列目、左から2行目)を約5mm沈めた。2回目の撮影でのターゲットの空間座標の近似値は、1回目の撮影と調整計算で得た値を使う。従って変位検知の処理は全自動である。

## 6-4 変位の検知

変位検知を行った結果、図-6.1の結果を得た。図の上左窓は各ターゲットを順番に並べてそのXYZ方向の変位量を求めたものである。青がX、緑がY、赤がZ方向を示す。図の横軸はターゲット番号である。実際に動かした5mmが正しく再現されている。中央は変位検知の検定統計量の値であり、上右窓に生起確率を示す。Tの値は1点だけ異常に大きい。また生起確率は100%である。変位量の計測値を見るとY方向1.5mm程度の変位は誤差分散を超えて検知できそうであり、これは図-6.3のシミュレーションでの検知可能量に一致する。

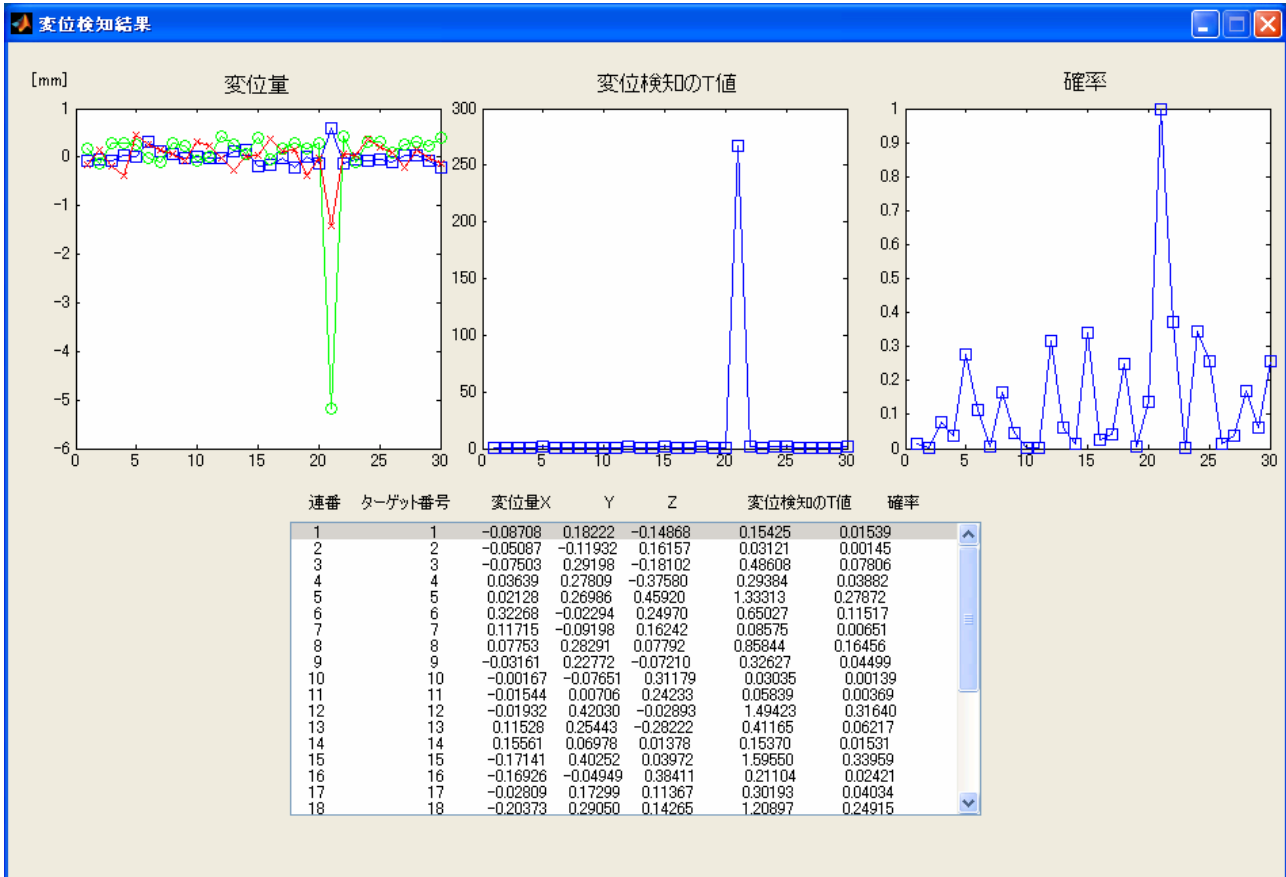


図-6.1 変位の検知結果

## 7. まとめと今後の課題

斜面変位を長期に渡って観測するための写真計測システムを構築した。これは3つのサブシステムからなっている。

- (1) 「調整計算と変位検知プログラム」ターゲットを撮影してその空間座標を求め、さらに2回の時間のエポック間において変位があったかを検知する。
- (2) 「シミュレータ」所要の検知感度を得るためのターゲットと撮影の形態を決める。
- (3) 「Webで管理するデータベース」撮影写真、ターゲットの座標、変位検知の経年データを一括して管理する。

最後に実験でシステムの検知性能を示した。実用に近い大きさのターゲットを斜面に配置し、与えた変位が検知できるかを実験した。実験では場所の制約からターゲットを密にしている。今後は現場での実験を進めていく必要がある。また観測データをWebから管理するサブシステムは、実験的に作ったもので、実用のレベルではセキュリティ、速度、さらに通信手段（ネットワークに接続する方法）の問題がでる。これらは今後の課題である。