

# レーザー光と光センサーを利用した2次元変位計測システムの開発

伊藤和也\*1

## 1 目的

建設工事中の斜面崩壊による労働災害は、請負金額・工期・作業人数がいずれも小さな中小規模工事での被災がほとんどを占めている。これらの背景には、中小規模工事に対応した労働災害防止技術の開発の立ち遅れや、経費に余裕のない中小規模工事においても利用可能な簡易で廉価な対策工・警報装置が十分に整備されていないと考えられる。本研究にて対象とする切土掘削工事による斜面崩壊は、崩壊が小規模であり、崩壊発生の前兆現象が明確に現れず、一瞬のうちに土塊が滑動することが多い。そのため、労働者が退避する時間的余裕が無く被災に至る。しかしながら、地すべりにおける事前崩壊予測と同様に、崩壊直前には斜面に何らかの前兆現象が生じており、施工中に切土法面を動態観測することにより、斜面崩壊の事前予測は可能であると考えられる。また、自然斜面の崩壊では、崩壊箇所・崩壊規模を事前に特定することが難しいが、斜面崩壊による労働災害では、崩壊場所は急勾配に掘削された箇所限定され、崩壊規模も工事規模に応じて予想できる。そのような観点から、本研究では切土掘削工事にて使用可能な廉価かつ高精度な変位計測機器の開発を行った。

## 2 システムの概要

今回開発したシステムの基本パターンを図1に示す。本システムはレーザー発光部、レーザー光を受光する光センサー受光部から構成される。これらは、それぞれレーザーポインターモジュール、太陽電池基板のような普及品を有効利用することでコストを下げることをねらったものである。既往の研究において筆者らは、「1素子による発電量の低下から変位を計測する方法」や「同心円状に分割した素子を利用して変位量を計測する方法」について検討を行ってきた。本研究ではこれをさらに精度良く、広範囲の計測が行えるようにするために、光センサーをマトリックス状に配置する方法を採用した。石川は、圧力センサーや光センサーなどをマトリックス状に配置した場合、2次元的に分布する物理量に対して、その分布の中心位置と総和の検出方法を提案している。光センサーをマトリックス状にすることができれば、崩壊時の水平成分・鉛直成分の変位量を計測でき、より詳細な動態観測が可能になる(図2)。現在、2次元以上の変位を同時に計測できる計測器としては、3次元レーザーキャナ、GPSによるリモートセンシング、CCDカ

メラによる3次元計測、埋設型三次元変位計などがあり、自然災害や地すべり対策地域での結果について多く報告

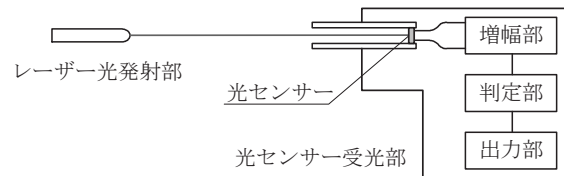


図1 システムの基本パターン

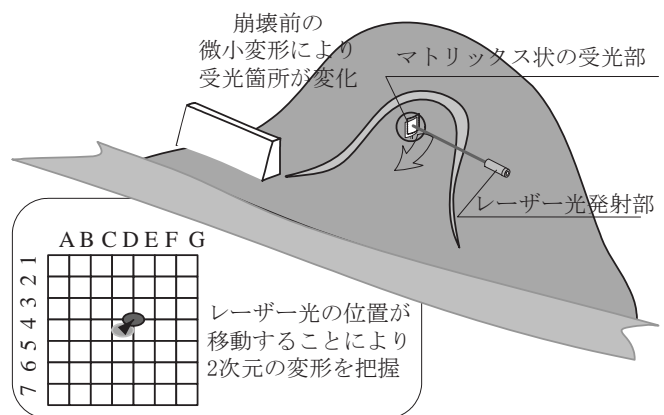


図2 マトリックス状に配置されたセンサー

されている。しかし、何れもコスト的な問題により中小規模工事の安全監視システムとしての利用は、現状では困難と思われる。それに対して、光センサーを利用する本システムは、比較的簡易なシステム構成であり、コストも廉価となる可能性がある。そこで、本研究では光センサーをマトリックス状とした2次元変位を計測する方法(以下、光センサー式2次元変位計)についてシステムの開発を行った。

## 3 精度検証実験

### 1) 試験概要

室内にて光センサー受光部を強制的に移動させて、出力電力の挙動を計測することで光センサー式2次元変位計の性能について確認した。図3に実験風景を示す。移動には高精度ステッピングモータステージ POSICON (PM80B-50XY, コムス社製)を使用した。なお、PM80B-50XYの位置決め精度は $5\mu\text{m}$ である。実験は、レーザー光発射部と光センサー受光部の距離を3.0m、レーザー径を7.0mmに固定し、光センサー受光部を0.265mm間隔で移動させ、そこから得られる計測値と実際の変位を比較した。計測範囲は図4に示すような範囲26.5mm 26.5mmとした。なお、キャリブレーション実験は、同条件で合計5回実施した。

\*1 (独)労働安全衛生総合研究所。

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

(独)労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ 伊藤和也\*1

E-mail: k-ito@s.jniosh.go.jp



図3 精度検証のためのキャリブレーション試験装置外観

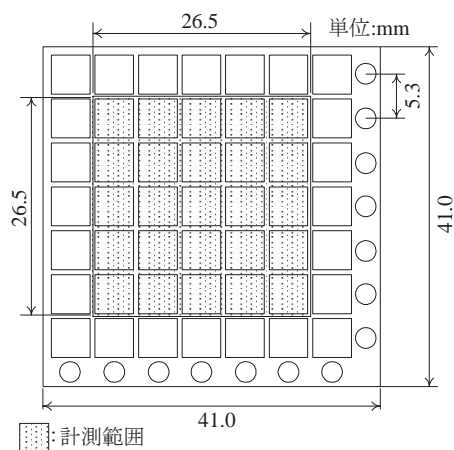


図4 キャリブレーション試験での計測範囲

## 2) 計測結果の誤差・信頼性の検討

計測結果の一例を図5に示す。セルに応じて周期的な変動を有しながら変位誤差が発現している。これらのX方向・Y方向の変位の誤差の一例を図6に示す。真値との誤差はX軸に関して $\pm 0.5\text{mm}$ 、Y軸に関して $\pm 0.3\text{mm}$ であった。次に5回の実験毎の誤差発現の違いについて調べ、光センサー式2次元変位計の信頼性について検討した。図7は各2ケースの実験で得られた誤差差分をコンター図としたものである。これらの図から、実験の違いは $0.1\text{mm}$ 以内であり、再現性や信頼性については確保されていると判断される。

精度検証のための強制変位によるキャリブレーション試験の結果、光センサー式2次元変位計は最大 $\pm 0.5\text{mm}$ の誤差が発現することが分かったが、この誤差を補正することで、より高精度な変位検出が可能となると考え、誤差補正方法について検討した。

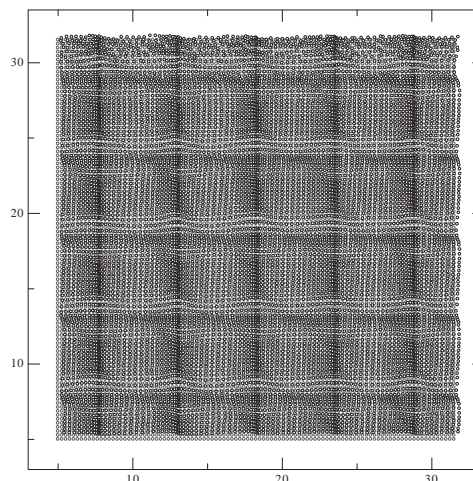
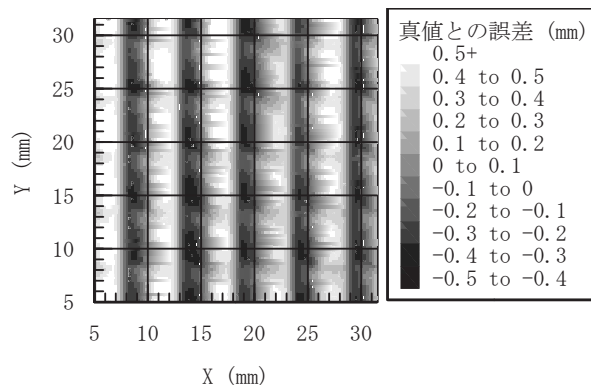
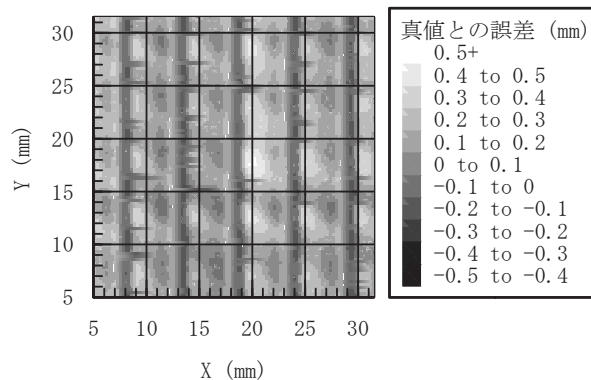


図5 実験結果の一例



(a) X方向



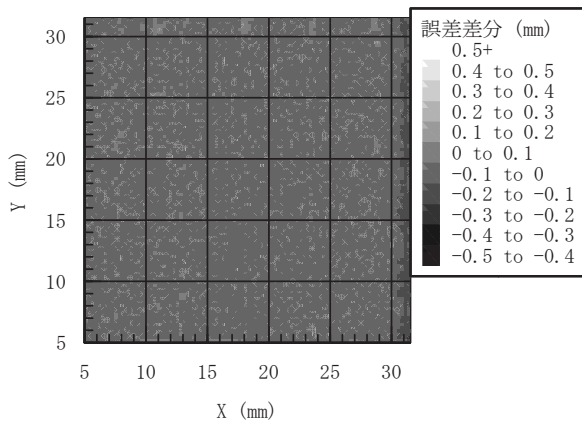
(b) Y方向

図6 真値との変位誤差の分布の一例

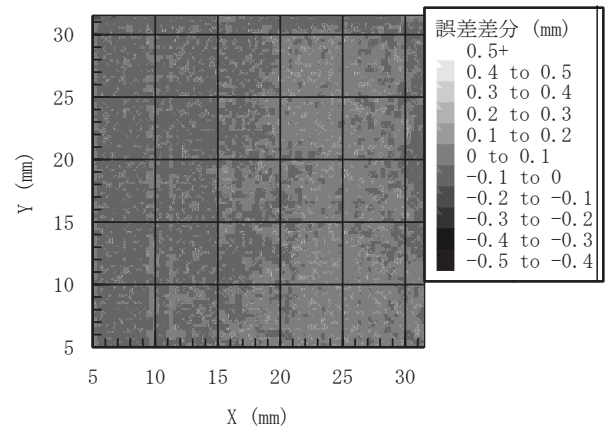
## 3) 誤差補正の概念

誤差補正は、印刷のゆがみを元に戻すような方法がある。しかし、この方法では繰り返し計算などが必要となり、計測システムとしては不都合が生じる。そこで、画像処理の幾何補正に使用されるバイリニア内挿法を応用し、下記のような概念で誤差補正を行うこととした。

今、図8のような既知点  $(X_1, Y_1)$ ,  $(X_2, Y_2)$ ,  $(X_3, Y_3)$ ,  $(X_4, Y_4)$  の内部に求めるべき点  $(X, Y)$  があるとす。なお、既知点は補正值  $(\delta X_1, \delta Y_1)$ ,  $(\delta X_2, \delta Y_2)$ ,  $(\delta X_3, \delta Y_3)$ ,  $(\delta X_4, \delta Y_4)$  が与えられており、それにより正解の位置が求められるものとする。求めるべき点  $(X, Y)$  の補正值



(a) X方向の誤差差分



(b) Y方向の誤差差分

図7 実験の違いによる誤差差分の一例

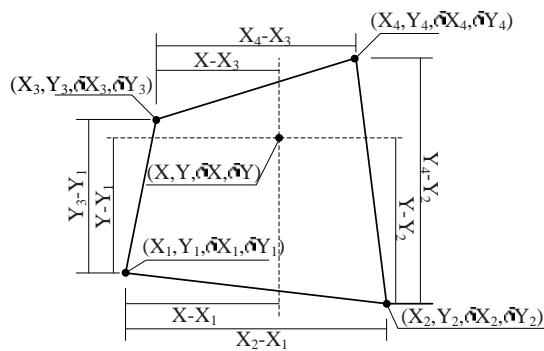


図8 誤差補正方法

$(\delta X, \delta Y)$  は以下の式で求められる。すなわち、

$$\delta X = \delta X_a + (\delta X_b - \delta X_a) \times \frac{\{(Y - Y_1) + (Y - Y_2)\}}{\{(Y_3 - Y_1) + (Y_4 - Y_2)\}}$$

$$\delta Y = \delta Y_a + (\delta Y_b - \delta Y_a) \times \frac{\{(X - X_1) + (X - X_2)\}}{\{(X_2 - X_1) + (X_4 - X_3)\}}$$

ここで、

$$\delta X_a = \delta X_1 + (\delta X_2 - \delta X_1) \times \frac{(X - X_1)}{(X_2 - X_1)}$$

$$\delta X_b = \delta X_3 + (\delta X_4 - \delta X_3) \times \frac{(X - X_3)}{(X_4 - X_3)}$$

$$\delta Y_a = \delta Y_1 + (\delta Y_3 - \delta Y_1) \times \frac{(Y - Y_1)}{(Y_3 - Y_1)}$$

$$\delta Y_b = \delta Y_2 + (\delta Y_4 - \delta Y_2) \times \frac{(Y - Y_2)}{(Y_4 - Y_2)}$$

これらの補正演算を行うことができるシステムを構築し、再度、強制変位によるキャリブレーション試験を実施した。

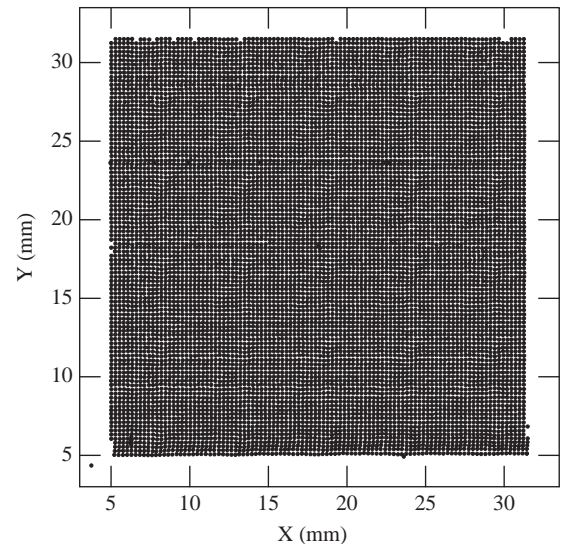
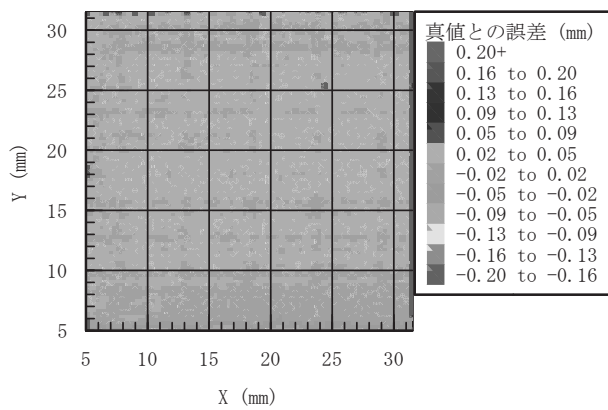


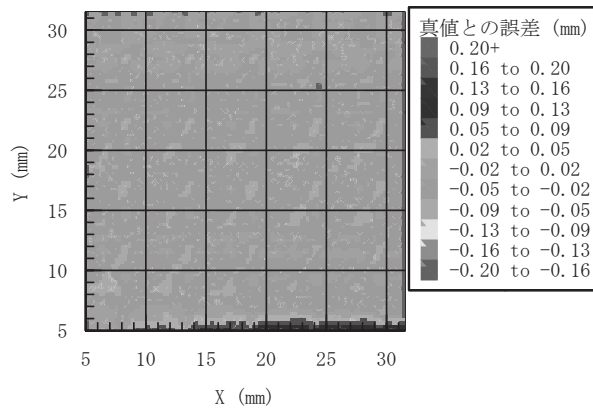
図9 キャリブレーション試験での計測範囲

#### 4) 計測結果と誤差について

真値と誤差補正演算を施した計測値の比較を行った。図9に計測結果の一例を示す。ほぼ全てのデータが方眼状に並んでおり、真値に近い形で補正されたことを示している。これらを詳細に確認するために、各軸における誤差分布の一例を図10に示す。誤差は端の一部に誤差が大きな箇所が見られる。これは、補正前の既知点が歪んだ形で配置されており、補正演算が正確に実行できなかったものと想像される。しかし、それ以外では±0.05mmの幅に誤差が収まっており、高精度な2次元計測システムが構築できたといえる。



(a) X方向



(b) Y方向

図 10 真値との誤差分布の一例