

しらす斜面崩壊警報システムにおける ひずみ測定の精度に関する研究

山田 猛矢¹・福重 彩夏²・岡林 巧³

¹ 第一工業大学 情報電子システム工学科 (〒 899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)
E-mail: t-yamada@daiichi-koudai.ac.jp

² 第一工業大学 情報電子システム工学科卒業 (〒 899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

³ 第一工業大学 自然環境工学科 (〒 899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)
E-mail: t-okabayashi@daiichi-koudai.ac.jp

A study of the accuracy of the strain measurement on Shirasu slope failure warning system

Takeshi YAMADA, Ayaka FUKUSHIGE, Takumi OKABAYASHI

Department of Information and Electronics Systems Engineering, Daiichi Institute of Technology
(1-10-2 Kokubu Chuo, Kirishima City, Kagoshima 899-4395, Japan)
E-mail: t-yamada@daiichi-koudai.ac.jp

Department of Environmental Engineering, Daiichi Institute of Technology
(1-10-2 Kokubu Chuo, Kirishima City, Kagoshima 899-4395, Japan)
E-mail: t-okabayashi@daiichi-koudai.ac.jp

Abstract : This paper is a study on the accuracy of the strain measurement of Shirasu slope failure warning system produced last year. It was discussed accuracy of the device by comparing the experimental results with the strain measuring device was fabricated and the theoretical value. As a result, it was found that the cause of the error is due to the fluctuation of the acceleration sensor itself and the numerical calculation algorithm. In addition, the error was found to be suppressed to 0.04 m.

Keywords : Shirasu slope failure, accuracy of the strain measurement

1. はじめに

本研究は、昨年度作製した「しらす斜面崩壊警報システム」[1]のひずみ測定装置の精度についての研究である。現段階において本システムの斜面崩壊予測は、ひずみ測定のみで行っている。そのため、ひずみ測定の精度を正確に知ることは、斜面崩壊の予測を行う上で欠かすことができない。本研究は、作製したひずみ測

定装置で実験を行い、理論値との比較を行ったうえで、どこまで精度を高められるかを考察する。

2. ひずみ測定装置の概要

まず昨年度作製したひずみ測定装置の概要について記述する。本装置は、Raspberry Pi と呼ばれる超小型コンピュータ (図 1) と ST マイクロ社の加速度セン

サー lis3dh (図 2) を利用し作成された。Raspberry



図 1: Raspberry Pi

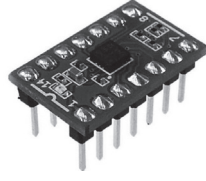


図 2: 加速度センサー

Pi に加速度センサーを搭載することで、自身の変位が計測可能となる。具体的には、 i 回目に x 方向の加速度 $a_x(i)$ が得られた時、速さの変化量

$$\Delta v_x(i) = a_x(i)\Delta t \quad (1)$$

から (ただし、 Δt は加速度の取得時間間隔)、そのときの変位

$$\Delta x(i) = v_x(i-1)\Delta t + \frac{1}{2}a_x(i)\Delta t^2 \quad (2)$$

$$v_x(i) = \sum_{j=1}^i \Delta v_x(j) \quad (3)$$

を計算する。これを足し合わせることで変位が求まる。式 (1), (2), (3) を用いて加速度を n 回取得した時の変位を計算すると

$$x(n) = \sum_{i=1}^n \Delta x(i) \quad (4)$$

$$= \frac{\Delta t^2}{2} \sum_{i=1}^n \left(2 \sum_{j=1}^{i-1} a_j + a_i \right) \quad (5)$$

となる。これをさらに整理しながら計算すると

$$x(n) = \frac{\Delta t^2}{2} \sum_{i=1}^n (2i-1)a_i \quad (6)$$

となる。 y, z 方向も同様に計算することで、自身の変位 ($r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$) が得られる。

これを斜面に設置することで、ひずみが生じた際、本装置の変位によりひずみの大きさ、また成長速度を得ることができる。我々は、ひずみの成長速度が急激に大きくなるときに斜面が崩壊すると予測し警報を出す。

3. 実験

我々はこのひずみ測定装置を使って、どの程度の誤差でひずみを測定できるか調べた。まず本装置を水平面上で、1秒間に1m移動させるという実験を1000回行った。表1が実験結果であり、変位 $\langle r \rangle$ は変位 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ の1000回の平均だが、結果は1.38mと

なり大きな誤差が含まれる結果となった。総時間とは移動させた時間である。1秒間移動させたが、装置で計測された時間は平均1.01秒となった。また計算処理時間の関係で加速度の取得時間間隔は平均0.145秒となった。

表 1: 実験結果

変位 $\langle r \rangle$	総時間	加速度の取得間隔 Δt
1.38 m	1.01 s	0.145 s

4. 混入誤差

次に混入する誤差について、理論的に考察する。混入する誤差の要因としては、加速度センサー自身の持つ揺らぎによるものと計算アルゴリズムによるものの2つが考えられる。そこで、これら2つの要因によりどの程度誤差が混入するかを考える。

4.1 加速度センサー自身の持つ揺らぎ

加速度センサーの取得する値は、真の値のまわりで揺らいでいる。図3は加速度センサーを水平に静止させた状態での x 方向の取得加速度 (10000 回分) の分布である。この分布は平均0、分散 $\sigma_x^2 = 0.00184$ のガウス分布となった。今回我々が用いた数値計算は式 (6) で変位を計算するため、この程度の揺らぎのある加速度の値を足し合わせていくことになる。そのため計算により得られた変位も揺らぎを持っており、その揺らぎは、足し合わせる数が多くなるほど大きくなる。

毎回取得する加速度の母分散 σ_x^2 は変わらないので、加速度を n 回取得した時の分散 $\sigma_{x_n}^2$ は、式 (6) より

$$\sigma_{x_n}^2 = n \left(\frac{\Delta t^2}{2} \sum_{i=1}^n (2i-1) \right)^2 \sigma_x^2 \quad (7)$$

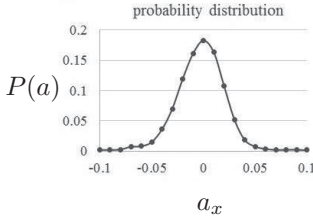
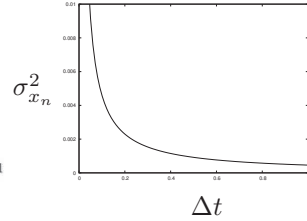
$$= n \left(\frac{\Delta t^2}{2} \cdot n^2 \right)^2 \sigma_x^2 \quad (8)$$

となる。この式に1秒あたりの取得回数 $n = \frac{1}{\Delta t}$ を用いると

$$\sigma_{x_n}^2 = \frac{1}{4\Delta t} \sigma_x^2 \quad (9)$$

となる。図6は、実験結果 ($\sigma_x^2 = 0.00184, \Delta t = 0.145$) を代入したものである。グラフを見てわかるように、 Δt が0に近づく (取得回数が多い) と $\sigma_{x_n}^2$ が大きくなるのがわかる。

実験では、装置を水平面上で移動させているので、 x 方向の議論だけでは不十分である。そこで y 方向も考慮した σ_r^2 (ただし、 $r = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$) を求める。 σ_r^2 を求

図 3: 加速度 a_x の分布図 4: 分散 $\sigma_{x_n}^2$

めるにあたり、まず

$$r'^2 = \left(\frac{x_n}{\sigma_{x_n}}\right)^2 + \left(\frac{y_n}{\sigma_{y_n}}\right)^2 \quad (10)$$

を考える。 $\frac{x_n}{\sigma_{x_n}}$, $\frac{y_n}{\sigma_{y_n}}$ はそれぞれ平均 0, 分散 1 のガウス分布に従うので, r'^2 は自由度 2 の χ^2 分布に従う。また

$$\sigma_{x_n}^2 \simeq \sigma_{y_n}^2 \quad (11)$$

と近似すると

$$r = \sqrt{\sigma_{x_n}^2 r'^2} \quad (12)$$

となる。つまり r'^2 が自由度 2 の χ^2 分布に従うとわかっているのので, 変数変換を行うことで r の分散 σ_r^2 を求めることができる。実際に σ_r^2 を計算すると

$$\sigma_r^2 = \frac{4 - \pi}{2} \sigma_{x_n}^2 \quad (13)$$

となり, 式 (9) を代入すると

$$\sigma_r^2 = \frac{4 - \pi}{8\Delta t} \sigma_x^2 \quad (14)$$

となる。この式に実験で得られた $\Delta t = 0.145$, $\sigma_x^2 = 0.00184$ を代入すると $\sigma_r^2 = 0.00136$ となる。

4.2 アルゴリズムにより混入する誤差

次に数値計算アルゴリズムにより混入する誤差について考える。今回採用した計算は, 取得した加速度 a から単純に等加速度直線運動の式 $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ に代入し求めたものである。つまり n 回目に取得した加速度 $a(n\Delta t)$ を用いて

$$\Delta x = v(n\Delta t)\Delta t + \frac{1}{2} a(n\Delta t)(\Delta t)^2 \quad (15)$$

とし, 微小変位 Δx を計算した。しかし, この計算では図 5 の台形 ABCD の面積を求めており, 真の変位ではない。真の変位は

$$\Delta x = \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} v(t) dt \quad (16)$$

である。つまり 1 回当たりの x 方向の誤差

$$\begin{aligned} \Delta E_x &= v(n\Delta t)\Delta t + \frac{1}{2} a(n\Delta t)(\Delta t)^2 - \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} v(t) dt \\ &\simeq \frac{(\Delta t)^2}{2} (2a((n+1)\Delta t) - a(n\Delta t)) \end{aligned} \quad (17)$$

となり, 1 回当たりこれだけの誤差が含まれることになる。式 (17) より $(\Delta t)^2$ に比例した誤差が混入してることがわかる。図 6 は, 実験から得られる $2a((n+1)\Delta t) - a(n\Delta t) = 3.56$ を代入したグラフである。

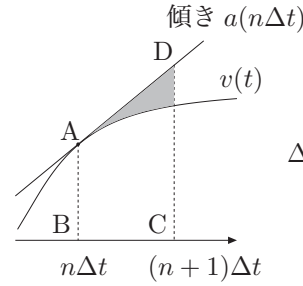
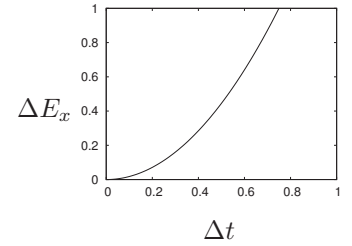


図 5: 混入誤差

図 6: 誤差 ΔE_x

1 回当たりにこれだけの誤差が混入するので, n 回計算した時の混入誤差

$$E_x = \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (18)$$

$$\simeq n\Delta E_x \quad (19)$$

$$= \frac{\Delta t}{2} (2a((n+1)\Delta t) - a(n\Delta t)) \quad (20)$$

となる。図 7 は, 実験から得られた $2a((n+1)\Delta t) - a(n\Delta t) = 3.56$ を代入したものである。式 (20) に $n = \frac{1}{\Delta t}$ および実験から得られた $\Delta t = 0.145$, $2a((n+1)\Delta t) - a(n\Delta t) = 3.56$ を代入すると $E_x = 0.261$ となる。

y 方向も同様に誤差が混入する仮定すると, 誤差 E は図 8 のようになり, 計算すると

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (21)$$

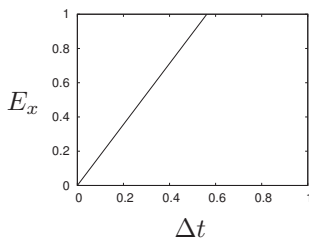
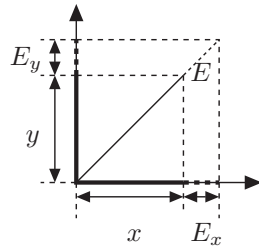
$$\simeq 0.368 \quad (22)$$

となる。

5. 実験値と理論値の比較

5.1 実験値と理論値の比較

表 2 が実験値と理論値をまとめたものである。実験では装置を 1m 移動させたが, 測定結果 ($\langle r \rangle$) は 1.38m と大きなずれがあった。しかし, 数値計算により混入する誤差が $E = 0.368$ m, また加速度センサー自身の持つ揺らぎの分散 $\sigma_r^2 = 0.00136$ ($\sigma_r = 0.0369$)

図 7: 誤差 E_x 図 8: 誤差 E

ということを見ると、この結果は妥当なものであり、誤差の要因はこの2つであったといえる。

表 2: 実験値と理論値

$\langle r \rangle$	$\langle t \rangle$	Δt	σ_r^2	σ_r	E
1.38	1.01	0.145	0.00136	0.0369	0.368

5.2 誤差を抑える

そこで、計算アルゴリズムを工夫することにより、どれだけ誤差の混入を抑えることができるか考える。これまで見てきたように、 Δt を小さくすれば誤差 E を抑えることができるが、 Δt が小さくなることにより取得回数が増えるため分散 σ_r^2 は大きくなってしまふ。では、誤差をできるだけ抑えるためには Δt をどのように取ればよいだろうか。

図9が σ_r^2 , E および2つを足し合わせた $\sigma_r^2 + E$ のグラフである。この $\sigma_r^2 + E$ を最小にする Δt が、我々の使用した装置、行った数値計算において、分散を抑えつつ誤差を最小にする Δt である。その値は $\Delta t = 0.00846$ である。数値計算のアルゴリズムを工夫し、仮にこの値が実現できれば、混入する誤差は0.04m程度に抑えられる。

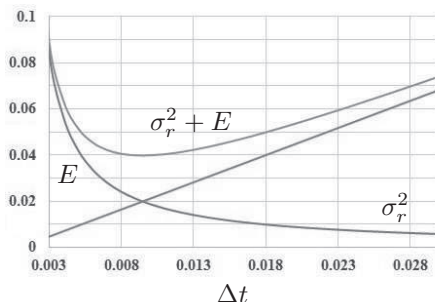


図 9: 誤差を抑える

6. まとめと今後の課題

昨年度作製したひずみ測定装置を使って変位測定の実験を行ったところ、平均で0.368mの誤差が混入することがわかった。またその要因が、加速度センサー自身の持つ揺らぎによるものと数値計算アルゴリズム

により混入する誤差であることが、実験値と理論値の比較によりわかった。さらにこの装置においては、計算上ではあるが誤差を0.04mまで抑えられることもわかった。

ひずみ測定は「斜面崩壊警報システム」において、斜面の崩壊を予測する非常に重要な要素である。今のままでは誤差の混入が大きく実用化は難しい。アルゴリズムの工夫や、より高性能な加速度センサーを用いるなどしてひずみ測定の精度を上げることが今後の課題である。

謝辞

本研究は、第一工業大学研究開発助成金の支援により実施された。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 山田猛矢, 岡林巧: しらす斜面崩壊警報防災システムにおける情報収集無線ネットワークシステムの構築, 第一工業大学研究報告 第27号
- [2] 福重彩夏: 斜面崩壊警報システムにおけるひずみ測定に関する研究, 第一工業大学 卒業論文 2015