

小型加速度センサによる傾斜監視 IoT デバイスの研究開発

東海大学 学生会員 ○荒木哲也・高橋 岳
東海大学 非会員 竹内 義晴
(株) タブレイン 非会員 高本 孝頼
東海大学 正会員 杉山 太宏

1. 緒 言

都市部や既存構造物近傍における新規建設工事では、周辺の既設構造物あるいは地盤を変状させることに細心の注意を払い、その許容変位量がゼロ～数 mm 程度を目指している。一方、建築の分野では住宅の建設後に基礎地盤の圧縮沈下や圧密沈下によって家屋が傾斜し訴訟問題に発展する事例が数多く、民事訴訟のかかなりの部分を占めている現状にある。このことで日本建築学会は、基礎の傾斜角・変形角が「3/1000 (角度約 0.17°)」を超えると基礎の機能性の低下や損傷の程度が増加するとしている¹⁾。この基礎地盤の変状や沈下を定量的に捉える方法として、一般には水準測量が行われるが、常時観測はできない上に人件費も年々高騰している。本研究では、地盤変状による地盤の傾斜を高精度 (角度 0.02° 以下) で常時観測、その測定値をパソコンや携帯電話に通信でき、しかも安価な「傾斜計」の研究開発を目指した。本報告では、超小型・低消費電力の IoT モジュール “Leafony” を活用して作成した傾斜監視 IoT デバイスの研究開発の過程ならびに性能・課題について報告する。

2. “Leafony” について

Leafony は、超小型 (1 円玉大) で低消費電力のオープンイノベーション・プラットフォームで、新しい IT サービスや IoT のエッジノードなどの試作開発が簡単にできる。トリリオンノード・エンジン・プロジェクト²⁾がこのプラットフォームの研究開発を推進し、仕様などが確定したものを「Leafony」と呼ぶ。本研究では、リーフ (Leaf) のひとつで温度・湿度・照度・加速度の 4 センサを搭載したセンサリーフと Wi-Fi 通信用のキット ESP32 MCU リーフを組見合わせて利用した (図-1、以後 Leafony と称す)。



(a) 4sensors (b) ESP32Wi-Fi kit
図-1 センサリーフと Wi-Fi キット²⁾

3. 加速度センサによる角度計測

高精度 16 ビットの加速度センサでは、x, y, z の 3 成分の測定が可能である。加速度成分を 3 次元ベクトルと捉え、2 つの加速度ベクトル(x₁,y₁,z₁), (x₂,y₂,z₂)から 3 次元 (空間) ベクトルのなす角度 (傾斜角) θ を次式により計算する。これにより、360° どの方向に傾いても、同様にその傾斜角を検出可能である。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

angle = 0.08,	delta_H = 1.01mm
angle = 0.06,	delta_H = 1.09mm
angle = 0.05,	delta_H = 0.89mm
angle = 0.07,	delta_H = 1.26mm
angle = 0.08,	delta_H = 1.47mm
angle = 0.08,	delta_H = 1.37mm
angle = 0.22,	delta_H = 3.89mm
angle = 0.15,	delta_H = 2.63mm
angle = 0.05,	delta_H = 0.32mm
angle = 0.04,	delta_H = 0.67mm
angle = 0.07,	delta_H = 1.22mm
angle = 0.08,	delta_H = 1.45mm

図-2 加速度値から計算した傾斜角 θ と 1000mm 当たり的高低差 ΔH

図-2 は、自由にダウンロードできる加速度センサ読み取り用のサンプルプログラムに、式(1)の角度 θ (angle) と長さ 1000 mm に対して θ から求め

た高低差 ΔH (delta_H) の計算式を加え、シリアルモニタに表示させた計算結果の一例である。計測中、センサ類は静置していたにも拘らず、angle は 0.04～0.22° と変動した。加速度センサの分解能と常時微動によるものと思われるが、このままでは要求する精度 0.02° 以下を満たさないため、加速度計測時の周波数 f, 平均値計算のためのサンプリング数 NN, そして加速度レンジ R によるパラメトリックスタディにより最適な計測条件を次章で導出する。

4. 最適な加速度計測条件の導出

上述した 3 つのパラメータのうち、周波数 (10～400Hz), サンプリング数 (100～2000 回) を組み合わせて実施したパラメトリックスタディの結果が図-3 である。図は、周波数ごとにサンプリング数を横軸に、計算される傾斜角の変動量を縦軸にとり、計算値の最大値と最小値を黒色の横棒で、平均値を赤丸でそれぞれ示している。比較計算から、周波数が高いほど、サンプリング数が多いほど傾斜角変動量の平均値はより小さくなって 0.01° 以下に抑えられることがわかった。この結果から、周波数は f=400 Hz, サンプリング回数は NN=2000 回に設定することと

キーワード：傾斜計, 加速度センサ, IoT, 圧密沈下

連絡先：〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 TEL 0463-58-1211 E-mail: sugi@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

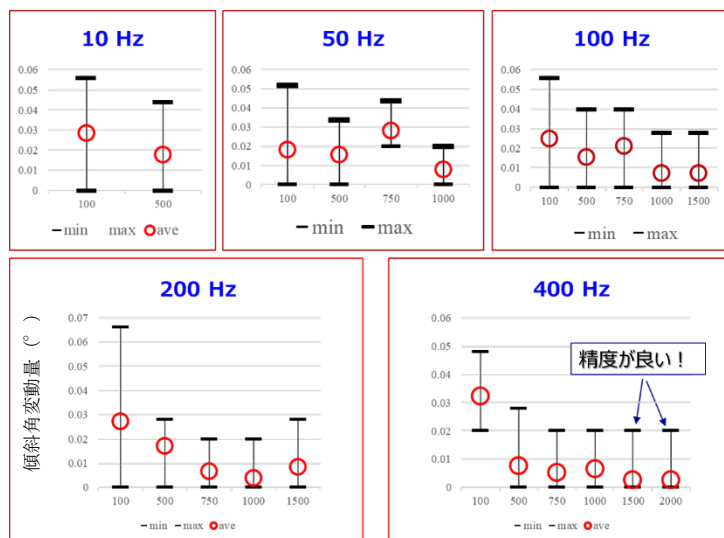


図-3 周波数、サンプリング数と傾斜角変動量の関係

した。なお、加速度レンジ R は 2~16 G で比較した結果から最も小さい R=2 G を採用した。

5. 傾斜台による傾斜角精度の検証実験

5.1 高精度水準器との比較実験

図-4 は実験用に作成した傾斜台で、反りや変形の少ない長さ 1000 mm×幅 400 mm×厚さ 18 mm の集成パイン材の四隅をアジャスターボルトで支え、ボルトの回転により 0.005° の傾斜を可能とした。高さの変動量測定にはダイヤルゲージ(榊尾崎製作所 0.01mm)を、傾斜角測定には 2 軸精密デジタル平面水準器 (DWL-1500XY, 精度±0.002°) を利用した。

図-5 は、片側のボルトを調整し 0.5 mm ずつ上昇させたときの水準器と Leafony の傾斜角を比較したものである。3~4 mm の変位時に 0.02° の差が認められるが、所望の条件である 0.02° 以下を満足することができた。

5.2 圧密沈下のリアルタイム監視実験

アジャスターボルトの 2 つ (図-4 の左側) を、粘土を詰めた一次元圧密試験機 (図-4 中⑤) に変え、合計 0.235kN おもりを載荷して圧密沈下に伴う傾斜角の経時変化を高精度水準器と 3 台の Leafony (1~3) を使用し測定した。Leafony-2 の測定結果を示したのが図-6 である。横軸は、おもり載荷からの経過時間で最大値は 20 分 22 秒である。載荷から 8 分頃までは一次圧密沈下により傾斜角が増加、その後沈下速度低下による傾斜角のゆっくりとした増加が 3 台の Leafony 全てで水準器との差もほとんどなく捉えられている。図-7 は、圧密沈下実験の測定結果を Wi-Fi を介してスマートフォンに出力した Google スプレッドシートの写真で、データ送信が問題なく実施できることを確認できた。

6. まとめと今後の課題

傾斜角 0.02° を検出するためのアルゴリズムとその検証実験により、必要十分な精度を有する傾斜監視 IoT デバイスの作製に成功した。実用化に向けては、タフな環境下 (例えば工事現場近傍や交通量が激しく常時微振動している環境) での測角精度の検証、定期的なデータ送信以外はスリープ状態にする省電力化や設定した閾値を超えるとツイートするプッシュ型通報機能などプログラムの強化、また、送信データをよりわかり易く通知するユーザーインターフェースの改善等が挙げられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会発行:「小規模建築基礎設計指針」, 第 10 章 基礎の障害と修復, pp.253, 2008.
- 2) <https://trillion-node.org/> 閲覧



① 天板 パイン集成材 1000×45×18 mm	② アジャスター ボルト × 4	③ ダイヤル ゲージ	④ 高精度水準器 DWL1500XY 精度: ±0.002°	⑤ 圧密試験機
---------------------------------	------------------------	---------------	--------------------------------------	---------

※実験検証 2 で使用

図-4 作成した傾斜実験台

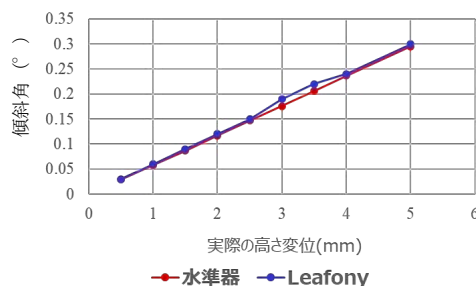


図-5 高精度水準器と Leafony による測定値の比較

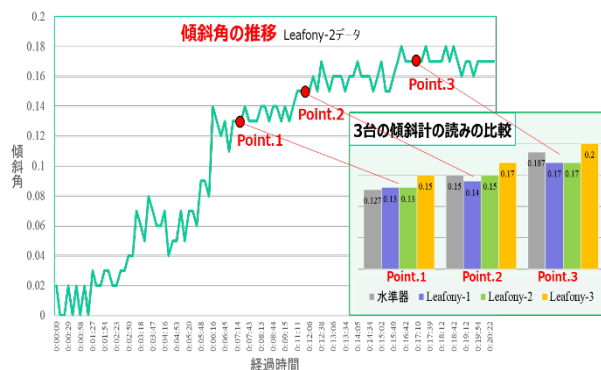


図-6 時々刻々と変化する傾斜角の測定結果 (3 台のデバイス(Leafony)使用)



図-7 Google スプレッドシートへの出力 (スマホ画面)