地震観測・振動実験のための簡易な加速度センサの特性評価

1. はじめに

近年,広く網羅的に地震計を配置し観測体制を整備するこ とが強震観測や耐震設計だけでなく,防災の観点からも重 要であると言われている.しかし,従来型の地震計は設置・ 管理等に膨大なコストが必要となるため実現性に乏しい.そ のため,ローコスト MEMS 加速度センサや RaspberryPi 等 のシングルボードコンピュータなどを用いた廉価な地震計 の利用が注目されている.

そこで、本研究では、我々の身の回りで最も身近な加速度 計と考えられる、スマートフォンやタブレット等のモバイ ル端末内蔵のセンサを含めた、簡易な加速度センサの性能 を加振実験により、その有用性を検証した.

2.1 実験の概要

実験は,10 台のモバイル端末と白山工業株式会社製の加 速度計 JU410 を水平2 軸振動台 BiCURI に固定して行われ た(図1).

使用された端末及びOS(オペレーティングシステム)のバ ージョンの詳細は表1に示す.

加振は表 2 に示す通り, 1995 年兵庫県南部地震の鷹取駅で の強震記録 (以下, 鷹取波) 3 回, 2016 年熊本地震本震の益 城町役場での強震記録 (以下, 益城波) 3 回と, 実効値 100, 20, 4 cm s⁻²のホワイトノイズ各 1 回を入力した.

表1 端末概要



表2加振ケースの一覧

	加振波	継続時間
T1	takatori	60 s
T2	takatori	60 s
T3	takatori	60 s
M1	mashiki	60 s
M2	mashiki	60 s
M3	mashiki	60 s
W100	whitenoise 100gal	約480 s
W20	whitenoise 20gal	約480 s
W4	whitenoise 4gal	約480 s

2.2 波形の時間刻みにおける特徴

従来型の加速度計では時刻歴は等間隔で刻まれる.一方で、モバイル端末の加速度センサで得られるデータは平均して約 0.01 s (100Hz) 間隔のデジタルデータであるが、時刻の情報は 0.001 s の桁まであり、時間刻みは一定ではなく不等間隔になっている.

図1は端末 A1 で記録された加速度データ,また,図2は 横軸に時刻,縦軸に1つ前のサンプル時刻からの経過時間 (以下,測定間隔)を取ったものである.データ転送の影響 名古屋大学 工学部 環境土木・建築学科

建築学プログラム 飛田研究室 塩路圭太 と思われる測定間隔の大きい時刻もあり,約1sごとに測定 間隔が0.1s程度を示している.また,約1s間に数回,測定 間隔が0を示す.

また,実験直前に GPS で時刻校正を行った JU410 と各端 末との間には 0~5 s 程度の時刻のずれが存在した.







図 3 端末 A1 の測定間隔

2.3 加速度波形の特徴

端末 A1 は大まかには加振波の波形を捉えられているように見える一方で、おおよそ一定の間隔で実現象とは異なる大きなパルス状のノイズが見られる(図 5).時刻歴加速度波形と測定間隔を比較すると測定間隔の値が 0 になるタイミングにおいて加速度波形にノイズが生じている(図 6).この特徴は端末 A1,G1 ともに見られた.







図6端末A1の時刻歴加速度波形及び測定間隔

3. 周波数特性の推定法

本研究では、ロム・スカーグル法を用いて不等間隔時系列 データのフーリエスペクトルを推定した¹⁾.これは等間隔 時系列データに対する離散フーリエ変換を不等間隔時系列 データに適合するよう補正したものである.

時系列データが不等間隔の離散値として $(t_1, x_1) \sim (t_m, x_m)$ の *m* 点で与えられたとする. このとき, 観測対象量 x(t) を 次のフーリエ級数で表現する. ω は基本角振動数であり, x(t) に周期 *T*を仮定して $\omega = 2\pi/T$ と表される.

$$x_k = \bar{x} + \sum_{l=1}^{\infty} \{A_l \cos l\omega(t_k - \tau_l) + B_l \sin l\omega(t_k - \tau_l)\}$$
(1)

ここで

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} x_k \tag{2}$$

$$\tan 2l\omega\tau_l = \frac{\sum_{k=1}^m \sin 2l\omega t_k}{\sum_{k=1}^m \cos 2l\omega t_k}$$
(3)

$$A_{l} = \frac{\sqrt{\frac{2}{m} \sum_{k=1}^{m} (x_{k} - \bar{x}) \cos l\omega(t_{k} - \tau_{l})}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m} \cos^{2} l\omega(t_{k} - \tau_{l})}}$$
(4)

$$B_l = \frac{\sqrt{\frac{2}{m}} \sum_{k=1}^m (x_k - \bar{x}) \sin l\omega (t_k - \tau_l)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m \sin^2 l\omega (t_k - \tau_l)}}$$
(5)

これらを用いて、*x(t)*の複素フーリエ係数を次式のように 計算することができる。

$$X_l = \frac{A_l - B_l i}{2} e^{-i\omega\tau_l} \tag{6}$$

4 スマートフォン内蔵の加速度センサの分析

4.1 地震波加振の結果

モバイル端末で得られた記録の平均の測定間隔は 0.011~ 0.017 s であった.得られた波形に対してロム・スカーグル 法を適用し,振動数刻み 0.015 Hz, プロット点数 65536 点の フーリエスペクトルを推定した.これにフーリエ逆変換を 行い,ハイカットフィルターで各波形 10 Hz 以上を除去す ることで等間隔時刻歴波形を推定した.

図8は3回の鷹取波の加振で端末A1で得られた波形から 等間隔時刻歴波形を推定し,JU410での記録に重ねたもので ある.また,表3は鷹取波の計測結果を元に計測震度を求め た一覧である.鷹取波ではJU410と端末A1,G1の計測震度 の差が0.1~0.2程度となっている.

4.2 ホワイトノイズ加振の結果

図 10 は、実効値 100, 20, 4 cm s² のホワイトノイズにおけ る端末 A1, G1 の JU410 に対する伝達関数 (H₁ 推定法によ る) とコヒーレンスを示す.別の検討により、JU410 は入力 に対して十分に平坦かつ束一的な特性を持つことが確認済 みであるため、この伝達関数は実入力に対するセンサの応 答を示していると見做すことができる.端末 A1 は端末 G1 に比べ性能が高いことが見て取れる.100,40 cm s²のホワイトノイズに対しては両端末ともに振幅倍率 0.8~1.0 を示し, 位相差のばらつきは小さく,かつ比較的高いコヒーレンス を示している.一方で,4 cm s²のホワイトノイズに対して は振幅特性・位相特性ともにばらつきが大きく,コヒーレン スが小さいことから,十分な精度が保たれないことが示さ れた.



図8 鷹取波加振から推定した等間隔時刻歴波形(A1端末) 表3 鷹取波加振のJU410及び端末A1,G1での計測震度

	NS	EW	合成値
JU410/加振T1	6.1	6.3	6.5
端末A1/加振T1	6.0	6.3	6.3
端末A1/加振T2	6.1	6.2	6.4
端末A1/加振T3	6.1	6.4	6.4
端末G1/加振T1	6.2	6.1	6.3
端末G1/加振T2	6.2	6.3	6.5
端末G1/加振T3	6.2	6.2	6.4
w100 把对值	w20 拖对值		W4 絶対自
understation and the second second	n. ^w ryn frhy	Hallan	



図 10 ホワイトノイズの伝達関数及びコヒーレンス

5 まとめ

本研究では、簡易な加速度センサの適切な利用につながる 知見を得るために、加速度センサで得られる波形の特徴を 分析し、その影響を明らかにした.特に測定間隔が一定で ないという特徴は、今後の応用を考える上で重要である. また、高性能のセンサを使った詳細な解析を目的とする観 測と広く普及を目指した簡易なセンサの使い分けが今後の 課題である.

参考文献

 Jacob T. VanderPlas, Understanding the Lomb-Scargle Periodogram, The Astrophysical Journal Supplement Series, 236:16 (2018)