

Raspberry Pi を用いた地震計測装置の IoT 化

IoT of the seismometry device using Raspberry Pi

○長谷川将士, 藤田凌太, 片岡俊一, 丹波澄雄

○Masashi Hasegawa, Ryouta Fujita, Shunchi Kataoka, Sumio Tamba

弘前大学

Hirosaki University

キーワード: ラズベリーパイ(Raspberry Pi), 地震(earthquake), IoT(Internet of Things),
リアルタイム計測(realtime measurement), シェルスクリプト(Shell Script)

連絡先: 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3 弘前大学 大学院理工学研究科
丹波澄雄 Tel:0172-39-3725

1. はじめに

建造物の応答は、振幅依存性があると言われており、人体に感じない常時の揺れ(主な原因は人間活動と言われている)から、体感できない地震、体感する地震や被害地震の揺れなど、異なる振幅のデータを保有分析することは意義深い。一方で、最近の地震計に付属している記憶媒体は大容量であり、通常の 100Hz サンプルングデータであれば、連続的に観測しても 3 ヶ月程度はデータを保有できる。よって、地震計を建造物に設置した後、数ヶ月にわたって連続的に振動データを取得することが最近行われ始めた。その際には、地震計の作動状況がモニタリングできると望ましい。更に、連続観測データの一部を解析できると地震計のモニタリングだけではなく、建造物の状況が把握できることになる。

最近の地震計は、IP 接続が可能ではあるが、セ

キュリティやトラフィックを考えた運用においてはこの機能は十分では無いように思える。そこで、地震計に安価な教育用のシングルボードコンピュータとして開発された Raspberry Pi を接続し、安全で自由度の高いインターネット接続機能を付加することで地震計を IoT 化することが可能である。これにより地震計による計測データはデータ収集サーバまでインターネット経由で届けられるようになり、利用者はサーバにアクセスすることで簡単に準リアルタイムで地震計による計測データが入手できる。本研究では市販の地震計に Raspberry Pi を接続することで地震計を IoT 化し、計測データをサーバから準リアルタイムで取得できるシステムを開発したのでその概容と計測事例を紹介する。

2. 地震計測器の仕様

今回使用した地震計測器は株式会社 東京測振製のセンサー一体型記録計 CV-374AV である。外観を Fig. 1 に示す。搭載されている速度計(センサ)は小型サーボ型速度計であり、XYZ 方向 3 軸において $\pm 2[m/s]$ (2kine)の範囲の測定が可能である。サンプリング周波数は 100, 200, 500, 1000[Hz]から選択でき、AD 分解能は 24[bit]となっている。記録部分として、記録時間は 1 分単位で可変長ではあるが、基本 10 分のデータを記録する。記憶媒体は CF カードで最大 2GB、データが容量に達した場合は古いデータを順次上書きして新しいデータを記憶する方式となっている。仕様の詳細は Table 1 を参照のこと。



Fig. 1 センサー一体型記録計 CV-374AV の外観

Table 1 地震計の仕様

	ネットワークセンサ CV-374AV / CV-374BV
センサ(内蔵)	サーボ型速度計
測定範囲	± 2 kine
周波数特性(センサ部)	0.1~70Hz
入力チャンネル数	3ch
AD変換	24bit
サンプリング周波数	100, 200, 500, 1KHz
記録媒体	CFカード×1枚
インターフェース	LAN(10/100 Base-TX) ×1ポート
動作電源	CV-374AV : DC10~24V (ACアダプタ付属) CV-374BV : 専用HUBより 供給

3. Raspberry Pi について

Raspberry Pi は AMD プロセッサ搭載の名刺サイズのシングルボードコンピュータであり、ハードディスクを内蔵せず、メモリカードを装着することによって OS の起動やデータの保存を行う。特徴は安価でありながら多様な入出力ポート(HDMI、USB、LAN)を使用できることである。今回は Raspberry Pi シリーズの Raspberry Pi Model B+というモデルを使用し、OS は Debian 系の Linux である Raspberry Pi に最適化されている rasbian を選択した。Raspberry Pi Model B+の主な仕様を Table 2 に示す。Raspberry Pi の問題点として、リアルタイムクロック保持機能を有していないことが挙げられる。



Fig. 2 Raspberry Pi Model B+

Table 2 Raspberry Pi Model B+の仕様

CPU	ARM1176JZF-S シングルコア 700MHz
メモリ	512MB
映像出力	HDMI
USBポート	4つ
LANポート	1つ
ストレージ	microSD
電源	600mA(3.0W)
大きさ	85.6mm×56.5mm

4. 地震計測データ取得システム

4.1 システム構成

地震計 CV-374AV はインターネットへのアクセス機能を有しているが、設定にスキルを要することと安全なデータ送信を確保するために、Raspberry Pi を直接接続することでインターネットへのアクセス機能を提供するものとした。Fig.3 は地震計測データ取得システム構成図である。地震計と Raspberry Pi は LAN ケーブルで直結し、FTP によって計測データを Raspberry Pi は取得する。Raspberry Pi は別のネットワーク接続機器によってインターネットに接続し、インターネットに接続されているサーバへ SFTP, SSH によって計測データを転送する。サーバは受け取ったデータをデータベース化し、またデータの可視化として時系列グラフを作成し、Web ページを通して公開する。

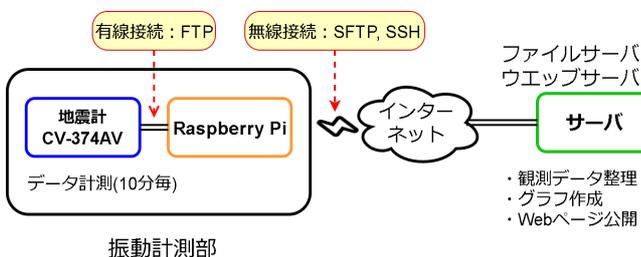


Fig. 3 地震計測データ取得システム構成図

4.2 Raspberry Pi の設定

地震計測では振動を検知した時刻が重要となるので、Raspberry Pi と地震計の時刻を高い精度で維持する必要がある。Raspberry Pi はリアルタイムクロック保持機能を有していないので、ネットワークに接続後 NTP による時刻合わせを行う。地震計の時刻合わせには GPS を用いる方法と NTP を用いる方法があるが、今回は地震計が有線 LAN で直接接続され

ている Raspberry Pi に時刻を問い合わせる方式とした。このために Raspberry Pi には NTP クライアントと NTP サーバの設定を行なった。これにより、Raspberry Pi が起動すると自動的に NTP サーバに時刻を問い合わせ、正しい時刻がセットされ、その後地震計が Raspberry Pi に時刻を問い合わせ、正しい時刻がセットされるようになる。

Raspberry Pi は有線 LAN に接続されている地震計へのアクセスとインターネットへのアクセスを行う必要があるため、ネットワーク経路を追加するためのルーティング設定も行った。今回は Raspberry Pi をインターネットに接続するために USB 接続の WiFi 機器を使用した。

4.3 地震計と Raspberry Pi の接続

地震計と Raspberry Pi は有線 LAN で直結されており、地震計が受け付けるコマンドは ftp と telnet のみである。そこでデータの受け渡しには ftp コマンドを用いることとした。地震計は 10 分間の計測データを一つのファイルに格納しており、ファイル名は「年月日時分秒.123.t3w」(例: 20170317164000.123.t3w, 2017年3月17日16時40分00秒のファイル)の形式になっている。今回使用した地震計の計測データの秒はすべて「00」と設定されていた。このファイルは内部記憶装置(CF カード)内にディレクトリ名が「年/月/日」となっている階層構造のディレクトリに保存されている。従ってファイルは 10 分毎に生成され、そのファイルにはファイル生成時刻以前の 10 分間の計測データが保存されている。地震計に記録されているファイルを Raspberry Pi に転送するための一連の手続きはシェルスクリプトとして実装し

た。スクリプトでは地震計のディレクトリ構造と同じ名称で Raspberry Pi 上にディレクトリを生成しファイルの転送を行っている。地震計でのファイルの生成時間間隔は 10 分なので、スクリプトも 10 分毎に実行されるように crontab の設定を行ったが、ファイル生成のために数秒を要していることから、安全を見て sleep コマンドで 30 秒間だけ実施を遅らせている。

地震計に保存されている計測データを Raspberry Pi に転送するために ftp コマンドの内部コマンド「mget」を用いている。ftp で最新のファイルだけを転送すれば十分なのだが、様々な理由で転送が定期的に行われなかったときは、未転送ファイルが多数存在することになる。この様な状況に対応するために、地震計と Raspberry Pi の双方で存在するデータをリストアップし、地震計にのみ存在するファイルを「comm」コマンドで抽出することで未転送ファイルのリストを生成し、このリストに従って転送する機能を組み入れた。

また、10 分間の計測データは約 700KB なので、Raspberry Pi に転送したデータをそのまま保持しておくで内部記憶装置の残量が約 160 日で 0 になるので、60 日以上前のファイルを削除するように設定した。

4.4 Raspberry Pi とサーバの接続

地震計から Raspberry Pi に転送されたファイルは一旦 Raspberry Pi に格納されるが、速やかにサーバへ転送される。ファイル転送の一連の手続きではデータの安全性を考えて sftp コマンドおよび ssh コマンドを用いた。ファイルの転送はスクリプトファイルに記述した手順で自動的に行われる必要があるので、人間の介入を必要としない公開鍵認証によるノンパスワード接続を実装した。

Raspberry Pi 上の計測データファイルは sftp コマンドの内部コマンド「mput」を用いてサーバに転送される。サーバに転送する場合も最新のファイルのみを転送すれば良いのだが、ネットワーク関係やサーバ自体のトラブル等によって転送できないファイルが蓄積することも起こり得る。この様な場合に対処するために、前節と同様に「comm」コマンドを用いて双方の差分をとり、最新データのみをサーバへ送信するように設定した。

5. サーバにおけるデータ解析

計測データはサーバに転送されてから、サーバ側で処理される。サーバが受け取った計測データファイルは地震計に保存されているときと同じディレクトリ名称と構造に保存される。次に、http プロトコルによってアクセスできる領域にアクセスが容易なディレクトリ構造の下に保存される。その後、計測データファイルからデータを抽出し、計測データの見える化を行う。見える化としてはデータファイル毎の全体像が把握できる時系列グラフの作成を行う。

1つの計測データファイルには 10 分間の計測データが記録されており、600 ブロックで構成されている。すなわち 1 ブロックには 1 秒のデータが格納されており、1 ブロックは開始コード、ヘッダ部、データ部、チェックサム、終了コードから構成されている。Fig. 4 に計測データの主なフォーマットを示す。グラフ作成のためには、計測データが格納されているデータ部を用いる。

計測データは 3 チャンネルに分かれて記録されており、それぞれ順に XYZ 方向のデータである。ここで、サンプリング周波数を s [Hz] とする。この時 $1/s$ 秒目は測定値そのものが記録されているが、 $2/s$ 秒

目以降は1/s秒前の計測値との差分値が記録されている。そのためデータには正と負の数値が混在する形となっている。2/s秒目のデータは、1/s秒目と2/s秒目のデータを加算することで復元される。3/s秒目以降のデータも同様の手順で復元される。

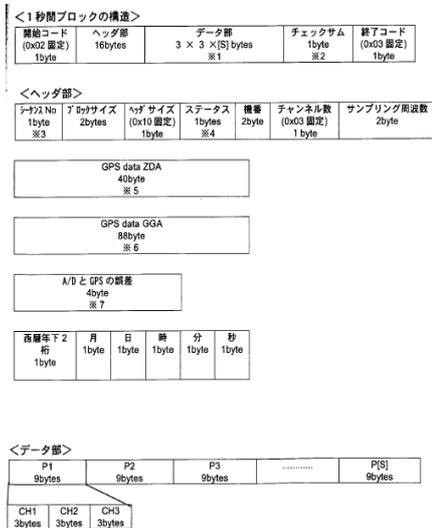


Fig. 4 データフォーマット

10分間のデータからX,Y,Z軸方向の時系列データを抽出した後、各軸方向毎の時系列グラフを「gnuplot」コマンドを用いて描き、pngフォーマットのグラフとして自動生成する。Fig. 5に2016年12月1日7:00~7:10のデータから作成されたグラフの例を示す。

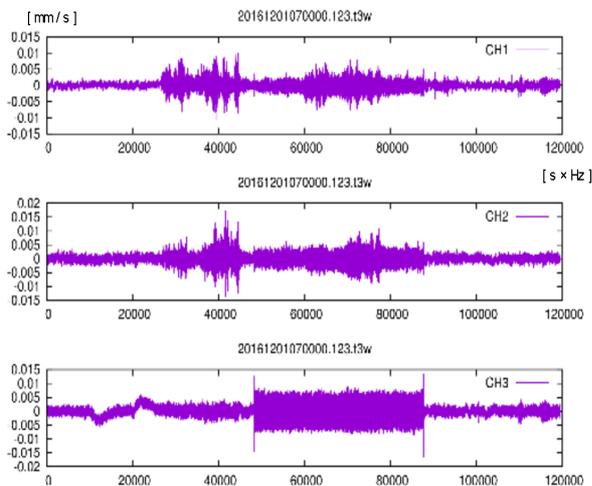


Fig. 5 2016年12月1日7:00~7:10の波形

6. Web によるデータ公開

今回は動作試験を主眼としているので、学内限定範囲で実際の測定データとそのデータから作成したグラフを閲覧およびダウンロードできるWebページ (<http://133.60.123.185>)を作成した。Fig.6は地震計測データの公開ページのトップ画面である。Webページにアクセスした時点での最新データファイル名がページトップに「最新データ」として表示されている。また、本日中に得られた全てのデータファイル名の一覧は「今日のデータ」としてページの左側に表示されている。ページ右側に表示されているグラフは最新データによる10分間のX,Y,Z方向の振動の様子である。

ファイルの実体へのアクセスのために、ファイルを保存してあるディレクトリへのリンクをトップページの下部に用意した。また、アーカイブされているデータファイルから作成した画像形式のグラフも同様に保存されているので、トップページの下部にアクセスのためのリンクを用意した。データファイルと画像形式のグラフは統一的な名称「yyyymmdd」のディレクトリに日単位で格納されているので、トップページのURLにファイルを保存してあるディレクトリ名称を"/"を用いて連結し、更に希望とする年月日を「yyyymmdd」形式で"/"を用いて連結することによって、目的とするファイルの格納ディレクトリが決定できる。対話的にファイルを取得する場合は、得られた文字列をウェブブラウザに入力することでファイルの一覧が表示され、希望のファイル名をクリックするとファイルがダウンロードされる。非対話的にダウンロードする場合は、`wget` や `curl` コマンドを用いてディレクトリ毎ダウンロードすることも可能であるが、初めにファイル名リストを取得し、そのファイル名を

用いて特定のファイルをダウンロードすることも容易である。

利用者側で最新のファイルをダウンロードするスクリプトファイルを作成し、cron コマンドで分間隔で自動実行させることで、最新のデータが常に手元に得られることになる。Fig.7 にスクリプトの例を示す。

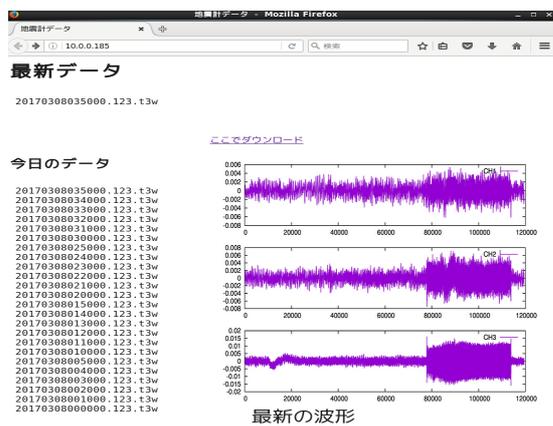


Fig. 6 地震計データ Web ページ

```
#!/bin/bash

YMD=`date +%Y%m%d`
HH=`date +%H`
MM=`date +%M`
MT=`expr $MM / 10 %* 10`

data=`echo $YMD$HH$MT`00.123.t3w`
w_data=`echo $data`.png`

#raw_data
wget http://133.60.123.185/download/$YMD/$data

#graf_data
wget http://133.60.123.185/wave_graf/$YMD/$w_data
```

Fig. 7 データダウンロードスクリプト例

7. 長期観測実験

今回開発した IoT 化された地震計測装置の長期観測の実験場所として、人間の影響が極力少ない場所である白神山地世界自然遺産地域の近くに位置している弘前大学白神自然環境研究所附属白神

観察園教育研究棟を選び、この研究棟の二階に設置した。Fig.8 に白神観察園の位置を示す。観測は 2016 年 11 月 28 日 12:00 から 2017 年 4 月 10 日 23:59 までの冬期間に行なった。この期間は冬季閉鎖期間になっているため人間の訪問による影響がかなり限られるので、観測には好都合である。

地震計のサンプリング周期は 200Hz であり、10 分間の計測データが一つのファイルに保存される。10 分毎に生成されるファイルは生成後 120 秒以内にサーバに転送されることになっており、この期間滞りなくデータが転送されていることを、Web ページで新規データが追加されていることから確認できた。

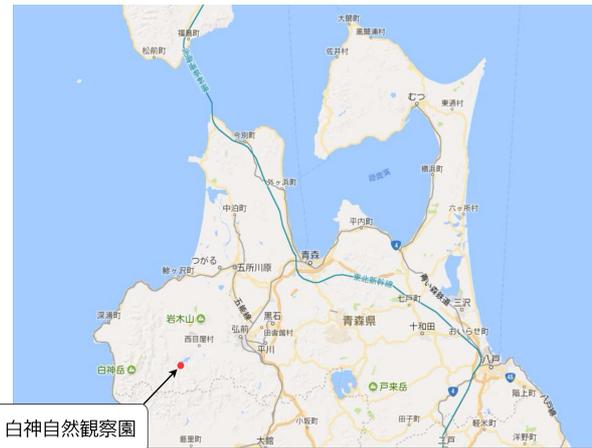


Fig. 8 白神自然観察園の位置

8. 観測された地震

観測期間 (2016/11/28 12:00~2017/03/31 23:59) までに弘前市あるいは西目屋村で有感となった地震はなかった。しかし、期間中に津軽平野内の気象庁の地震観測点のいずれかで有感となった場合が 3 例あった。Table 2 に 3 件の有感地震の概要を示す。また、Fig. 9~12 は 3 件の地震に関しての気象庁の地震観測所の震度分布を示している。我々が地震計を設置した弘前大学白神自然環境研究所

附属白神自然観察園教育研究棟の場所は白神山地の核心地域近くに位置しており、図中に示してある。

Fig.12は2017.01.22の3:11に発生した青森県東方沖の地震に対応した我々の地震計による観測結果である。グラフは3:10~3:20の期間のデータを示しており、P波が到達した時刻は3:11:32.6、S波が到達した時刻は3:11:56.6である。両者の到達時刻の時間差は24.0秒となる。P波の速度を8km/秒とすると震源までの距離は192kmとなる。図中の震央の位置と観察園の距離は約200kmであり、ほぼ同じ値が得られている。

Table 2 津軽平野内で有感となった地震

年	月日	時分	震源地域	深さ(km)	マグニチュード	有感地域(震度)
2016	12月28日	21:38	茨城県北部	11	6.3	鶴田町鶴田(1), つがる市稲垣町(1), 平川市猿賀(1)
2017	1月22日	3:11	青森県東方沖	37	4.5	つがる市柏(1)
2017	3月8日	1:08	青森県東方沖	65	5.5	藤崎町水木(1)

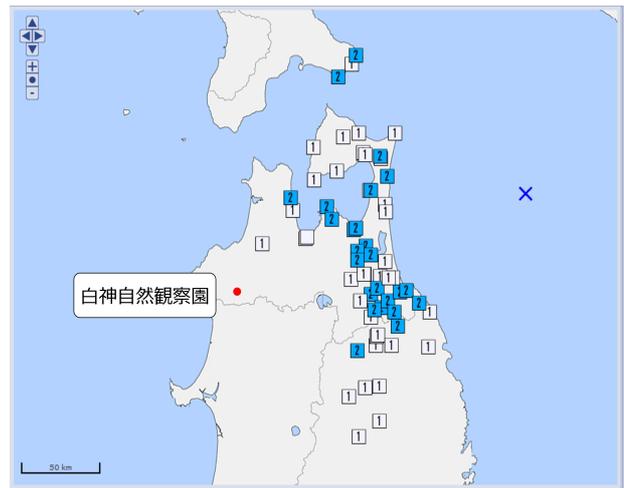


Fig. 10 2017.01.22 03:11 青森県東方沖

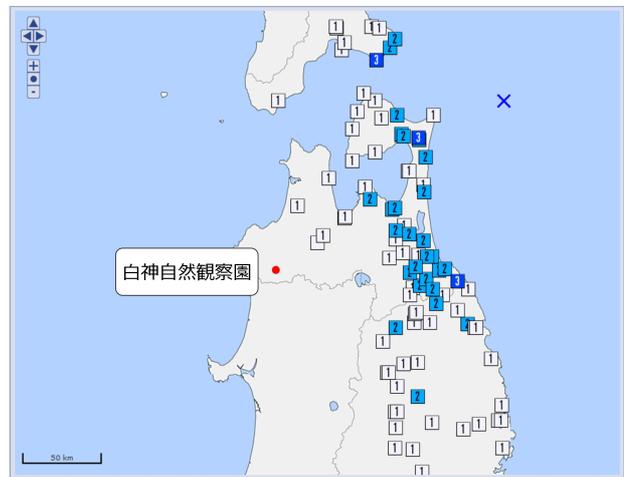


Fig. 11 2017.03.18 01:18 青森県東方沖



Fig. 9 2016.12.28 21:38 茨城県北部

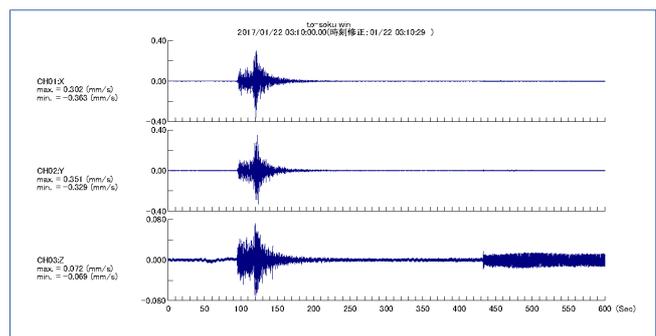


Fig. 12 2017.01.22 青森県東方沖の地震の記録

9. まとめ

今回は地震計測器を対象としてIoT化を行い、サーバ経由でデータを確認することまでを実現した。

IoT化のインターネット接続部分はシングルボードコンピュータである Raspberry Pi に汎用の Linux OS の一つである Debian 系列の Rasbian を用いた。組込系ではなく一般の OS を用いたことで開発も保守も容易に行うことができ、さらにデータファイルの転送はセキュアなコマンドを用いてほぼリアルタイムで行うことが可能になった。システムの開発においてはシェルスクリプト、解析においては C 言語を用いて実装した。また、コマンドを定期的に行わせるタイマー機能は Linux の標準コマンド cron を用いて実現した。

今回開発したシステムの Raspberry Pi に関する部分は汎用的に構成されているので、異なる計測機器に変更してもインターフェース部分が明確であれば容易に IoT 化可能といえる。

今後は更に長期の稼働試験を行い運用実績を蓄積すると共に、問題点を洗い出し改善していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 廣松隆志, 森重和春, ラズパイマガジン, 2015 年春号, 12/19, (2015)
- 2) 中橋一朗, UNIX シェルスクリプト 逆引き大全 333 の極意, 325/330, (2014)
- 3) SSHで鍵認証を用いて、パスワードなしでログインする方法, <https://hackle.com/20462465-2/>
- 4) 株式会社 東京測振, ネットワークセンサー CV-374AV2 取扱説明書