

歴史的街並みの長寿命化に向けた地域防災スマートセンサネットワークの社会実装評価

代表研究者

飯 島 洋 祐

小山工業高等専門学校電気電子創造工学科 准教授

1 はじめに

伝統的建造物群保存地区等を有する地区では、古くからの木造家屋などの歴史的建造物が集中し、細街路など古くからの街並みが現存している。しかし、それらは地震災害等の災害が発生した場合においては、建造物の倒壊など、その地域における防災の脆弱性の一つとなる可能性がある。昨今のこれまでの経験や想定を超える災害が発生している中、災害前に事前の十分な被害予測が困難である。そこで、これまでに伝統的建造物群保存地区の地震防災システムの開発を進め、地震発生時の建造物の振動特性のモニタリング技術を検討してきた^[1]。しかし、大規模な地震災害に限らずに、近年の気象変動による台風被害や豪雨や突風などの水害風害、それらの蓄積による鉄柱の倒壊などの建造物に起因する被害が発生する可能性がある。これら複合的な要因による想定外の災害被害に対応するには、平時から常に建造物の特徴を収集し、建造物の劣化や様々な要因による変化を監視する事で、想定の日害等への事前の予測と被災後の状況確認を迅速に対応可能になると考えている。そこで、本研究調査では歴史的街並みが残る地域において、歴史的な建造物とその街並みの長寿命化に向けた、平時からの建造物の健全性評価を目的とするセンサネットワークを構築する。

これまでに、地震発生時における地震振動による建造物の応答特性を監視するためのシステムを検討してきたが、平時から建造物の特徴を取得するには、地震発生時以外の常時微動による建造物モニタリングが必要になる。具体的には、本研究調査では図1に示すように平時から建造物毎に特徴の異なる固有振動特性を収集可能なシステムを開発し、将来的に取得した固有振動特性から建造物の異常検知への応用を目指している。建造物のヘルスマニタリングや異常検知について、国内外でこれまでに数多くの研究が検討されてきている。ビルや文化財などの構造解析での検討^{[2][3]}が進められ、国内では軍艦島（長崎県長崎市）の建造物の崩壊過程における振動データのリアルタイム解析などが実施されている。本研究調査では、歴史的な木造建造物を対象とし、安定的な速度で広範囲での無線通信が可能な地域 BWA（Broadband Wireless Access）に着目した、歴史的街並みの長寿命化に向けた地域防災スマートセンサネットワークを開発する。本研究調査では、これまでの研究成果をベースに、社会実装評価に向けた課題となっている常時微動計測システムとそれを用いたセンサネットワークシステム構築に向けた技術開発に取り組む。

本研究調査では、まずは歴史的木造建造物を対象に、常時微動計測によって建造物特有の固有振動数を計測するためのシステムを構築し、実際の木造建造物を対象に建造物固有の特性が常時微動計測から取得できる事を確認した。その後、地域 BWA を利用したセンサネットワークシステムを開発し、2つの運用シナリオでの社会実装を実験にて検証した。最後に、将来的に建造物1軒1軒へのセンサ実装に向け、小型かつ安価なセンサシステムの実現に向けた要素技術開発に取り組んだ。

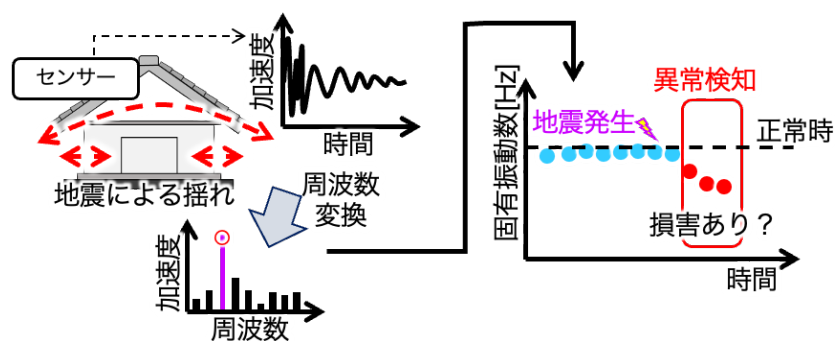


図1 常時微動計測による地域防災センサネットワークシステムの概要

2 歴史的木造建造物における常時微動による固有振動数計測

2-1 MEMS 加速度計による常時微動計測システムの構築

本研究調査では、歴史的木造建造物を対象に、常時微動にて建造物特有の固有振動特性を取得するための計測システムを構築した。具体的には、対象とする木造建造物の振動特性を取得するために加速度センサとして軍艦島等でのヘルスマonitoring^[1]にも実績がある日本航空電子工業株式会社 高精度 MEMS 加速度計 (JA-70SA) を用い、JA-70SA から加速度に応じて出力されるアナログ信号をアナログ-デジタル (A/D) 変換器でコンピュータに取り込み、デジタル信号処理にて周波数変換を施すことで建造物の固有周波数を取得する。本研究調査では、加速度センサから出力される 3 軸方向の加速度に応じたアナログ信号を 16 ビットの高精度 A/D 変換器にて 2000 サンプル/秒で取得し、高速フーリエ変換 (FFT) にて計測した加速度信号から建造物の固有周波数を取得する。周波数特性の計算では一定時間間隔で FFT した周波数特性を 10～20 分間でアンサンブル平均して計算している。図 2 に使用した加速度センサの外観と、構築したシステムの構成を示す。図 2 に示すように、16 ビット分解能の高精度 A/D 変換器を用い、JA-70SA からの 3 軸分のアナログ出力を A/D 変換器に接続し、USB 経由で加速度信号をコンピュータに取り込んでいる。実際の計測では、加速度センサは治具にて固定し、計測の際には水平合わせをした後に設置した。対象とする木造建造物によって、梁に直接センサを設置する場合には、図 3 に示すように加速度センサを L 字金具に固定して設置した。



図 2 常時微動計測システムの概要 (左図：加速度センサの外観、右図：システムの構成)



図 3 加速度センサの設置方法 (左図：治具にて水平設置する場合、右図：梁等に直接設置する場合)

2-2 歴史的木造建造物における固有振動数計測の実験

構築した常時微動計測システムにて、実際の歴史的木造建造物での計測実験を実施し、歴史的木造建造物における建造物の特徴差を検出できる事を検証した。実験として、栃木県栃木市の小山高専サテライトキャンパス内の見世蔵および土蔵での固有振動数計測を実施した。見世蔵とは店舗型の建築様式の木造建造物であり、図 4 のように 2 階床に加速度センサを設置し、人工的な振動を加えることなく、日常的な常時微動のみで固有周波数計測を実施した。加速度センサからのアナログ電圧の出力波形を図 5 に示す。図 5 中のスパイク状の振動は計測時における付近に自動車等が通過した際の振動である。図 5 の測定結果から一定期間毎の FFT 結果を加算して得た周波数特性を図 6 に示す。図 6 の結果では、約 10 秒毎の FFT 解析の結果を約 20

分間でアンサンブルにて取得した結果である．図 6 に示すように，計算した周波数特性から特徴的な特性が確認でき，この結果から見世蔵の 1 次固有周波数が約 8.5Hz である事が確認できた．



図 4 見世蔵における加速度センサによる常時微動計測の概要

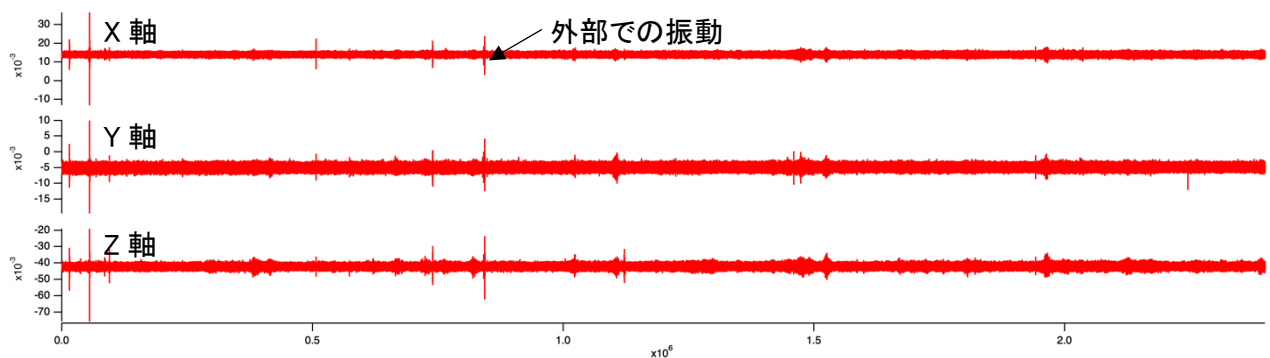


図 5 見世蔵での常時微動計測による加速度センサからの出力波形

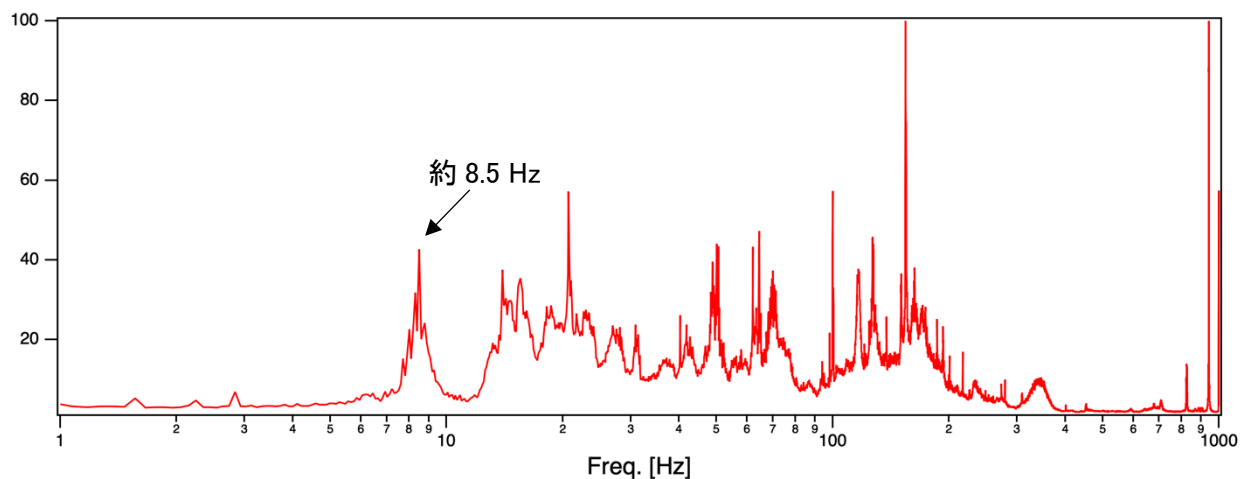


図 6 見世蔵での常時微動計測による周波数特性

次に，小山高専サテライトキャンパス内の土蔵にて実験した結果を図 7, 8, 9 に示す．図 7 に示すように，土蔵の 2 階の梁に加速度センサを設置して固有振動数計測を実施した．図 8 に計測した加速度センサからのアナログ電圧の出力波形を示し，図 9 には取得した固有振動特性を示す．図 9 に示すように，土蔵における 1 次固有周波数は約 5.8Hz であることが確認できた．見世蔵との結果と比較すると 2 つの建造物では固有周波数が異なっており，木造建造物による固有周波数の違いを確認できる．



図7 土蔵における加速度センサによる常時微動計測の概要

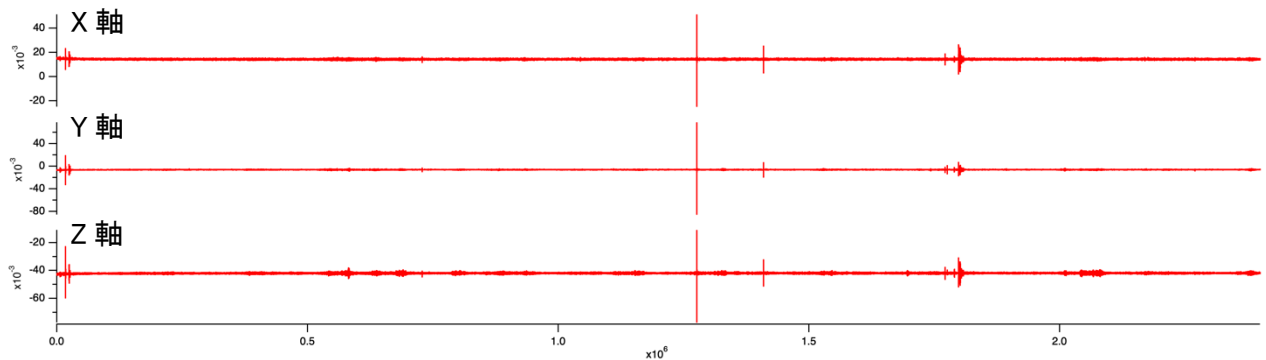


図8 土蔵での常時微動計測による加速度センサからの出力波形

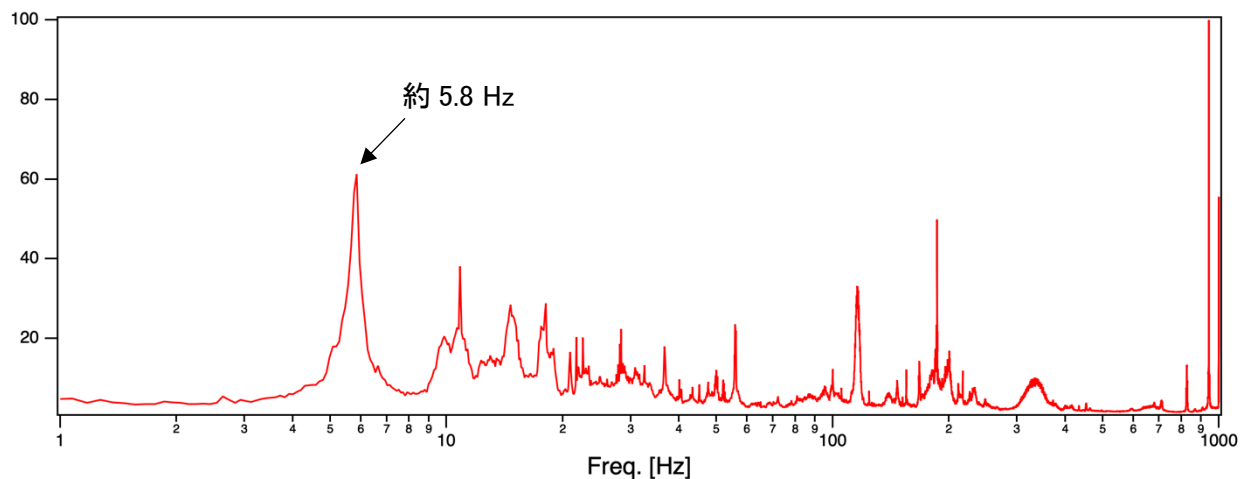


図9 土蔵での常時微動計測による周波数特性

3 地域 BWA をセンサネットワークシステムの開発

3-1 地域 BWA 連携による防災スマートセンサネットワークシステム

地域防災に向けたセンサネットワークシステムの構築に向け、本研究調査では地域 BWA (Broadband Wireless Access) 回線を利用した歴史的建造物のモニタリングシステムの構築を検討した。地域 BWA は、地域の公共福祉への寄与を目指して導入された無線システムであり、本研究調査では現在栃木県栃木市でサービスが運用されている地域 BWA を活用し、センサ情報を BWA 回線の連携によって収集するネットワークを構築した。栃木県栃木市で運用されている地域 BWA では、市内中心地から半径 2km 程度の範囲で利用が可能で

あり、歴史的建造物群保存地区に指定される嘉右衛門町地区や市内に点在する歴史的な建造物など歴史的街並みを有する栃木県栃木市内の主要な地域の殆どをカバーしている。さらに、地域 BWA 回線は LPWA (Low Power Wide Area-network) に比べて回線速度が高速であるため、加速度センサからの取得した数 MB 以上の容量となる建造物の振動データをエッジデバイスから外部サーバ等にアップロードする事が可能である。これによって、将来的にはエッジデバイスでは困難な詳細な波形データ解析をサーバ側で実施することが可能にある。

第 2 章で説明した固有振動数計測システムをベースに開発したセンサネットワークシステムの構成を図 10 に示す。図 10 に示すように加速度センサにて計測した建造物の常時微動計測のデータをエッジデバイスに取り込み、地域 BWA 回線にて FTP (File Transfer Protocol) にて外部サーバ（さくらインターネット VPS）にアップロードするシステム構成とした。加速度センサの出力されるアナログ信号から固有周波数を計算し、外部 FTP サーバにアップロードするエッジデバイスには名刺サイズの小型コンピュータである Raspberry Pi を利用した。Raspberry Pi では、加速度センサからの 3 軸方向のアナログ信号を Data Acquisition デバイス USB-1608FS-Plus (Measurement Computing Corporation 社) にて取り込み、FFT 処理にて固有周波数特性を計算し、計算結果を FTP サーバにアップロードしている。本研究調査では、FTP サーバ側にてアップロードされた建造物の固有周期情報を可視化する Web システムを試作し、図 10 に示すように Web ブラウザにてアップロードされた固有周波数特性をグラフにて表示可能とした。



(a) 開発した地域 BWA 連携の固有振動数計測システムの外観



(b) Web での可視化

図 10 地域 BWA 連携によるセンサネットワークシステム

3-2 歴史的建造物での社会実装評価

本研究調査では、構築したセンサネットワークシステムにて、(1) 歴史的建造物の定期的な固有振動数計測による健全性評価と、(2) 地震災害発生時などを想定した建造物の早期の損傷診断、の 2 つのシナリオを想定した社会実装評価を実施した。

(1) 定期的な建造物の固有振動数計測の運用評価

災害等の影響に限らず、建造物の経年劣化等の影響による健全性を評価し、長期的な見守りを想定して、定期的な建造物の固有振動数計測について社会実装評価を実施した。具体的には、一定間隔で建造物の固有周波数を計測し、FTP サーバに自動アップロードするシステムを検証した。本研究調査では、15 分間隔での固有振動数計測を自動で実行するシステムを構築した。その運用の結果、図 11 に示すように、15 分間隔で計測した固有振動数特性の結果を FTP サーバ上にアップロードされており、定期的な建造物の固有振動数特性の計測の運用を確認できた。アップロードするファイル名には計測した日時を設定している。

15 分間隔でアップロード

名前	サイズ	種別	属性	更新日時
freq_2020-11-28 05:57:02.721740.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 05:57
freq_2020-11-28 06:12:06.376664.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 06:12
freq_2020-11-28 06:27:04.141715.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 06:27
freq_2020-11-28 06:42:00.746690.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 06:42
freq_2020-11-28 06:56:58.766696.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 06:56
freq_2020-11-28 07:12:01.406630.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 07:12
freq_2020-11-28 07:27:00.110901.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 07:27
freq_2020-11-28 07:42:01.466628.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 07:42
freq_2020-11-28 07:57:01.890812.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 07:57
freq_2020-11-28 08:12:01.926676.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 08:12
freq_2020-11-28 08:27:00.591075.csv	1 MB	ファイル	rw-r--r--	2020/11/28 08:27

図 11 定期的な固有振動数計測での FTP サーバ上におけるアップロードファイルの一覧

(2) 地震等による建造物の早期の損傷確認の運用評価

地震災害等において、災害発生後に建造物が損傷することで、その後の倒壊などによって二次被害が発生する可能性がある。そこで、地震発生時における建造物の早期の損傷確認を想定したシステムの運用を評価した。具体的には、図 12 に示すように、加速度センサにおいて一定の振動以上を検出した場合に、その前後の加速度データをサーバ上にアップすることで、地震発生時などの前後の建造物の応答特性を収集可能とした。本研究調査では、図 11 に示すように一定の閾値以上の振動を検出した場合にその検出前 t_1 秒と検出後の t_2 秒の加速度データを取得し、サーバにアップロードするシステムとして運用した。地震発生前後の建造物の振動特性を自動で取得可能にする事で、地震災害等での損傷等による建造物の固有振動数特性の変化を検出でき、災害時における早期の建造物の損傷確認が期待できる。本研究調査では、栃木県栃木市の小山高専サテライトキャンパスの見世蔵にセンサを設置し、地震発生時における建造物の常時観測について社会実装評価を実施している。

図 13 には、社会実装評価において 2021 年 5 月 1 日に発生した宮城県沖を震源とする震度 5 強の地震発生時の観測データである。図 13 に示すように、地震発生時に地震発生前後のデータを自動で取得し、サーバ上に加速度データをアップロードしている。図 13 の結果では、地震発生前の 30 秒、発生後の 60 秒のデータを自動アップロードする設定としており、地震発生時の建造物の振動を検出し、その前後での建造物の振動データを FTP サーバに自動アップロードする運用を確認できた。

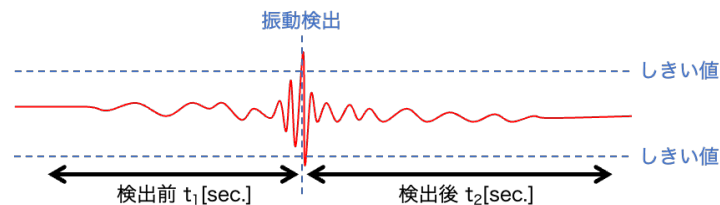


図 12 地震発生時を想定した建造物モニタリングの概要

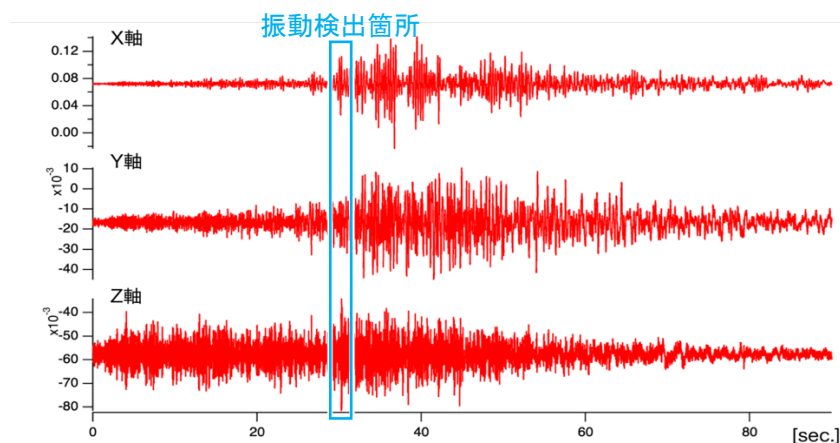


図 13 実測した見世蔵での地震発生前後の振動特性（2021 年 5 月 1 日発生地震）

本研究調査では、将来的に建造物1軒1軒に広くセンサを設置した地域防災スマートセンサネットワークの構築を目指している。このためには、センサモジュールを小型かつ安価に実現する事が重要であり、それに向けたシステム開発を検討した。建造物1軒1軒にセンサ設置をした上で対象エリアの広範囲の点情報を取得でき、その情報から面的な情報に拡大することを期待している。

建造物の固有振動数特性を取得するためには、取得した加速度の時系列データを FFT にて周波数変換する必要があるが、そのためには加速度データを一時蓄積するためのメモリが必要になる。本研究調査では、DSP 機能を有する小型マイコンである Microchip 社の dsPIC マイコンを用い、小型マイコンでの固有振動数計測に向けたシステム開発を検討し、システムの小型化を進めた。検討するにあたり、これまでの歴史的建造物に対する構造評価^[4]と専門家との議論にて、本研究調査で対象とする歴史的木造建造物の固有周波数は概ね 10Hz 以下であり、災害等にて建造物が損傷を受けた場合の固有周波数の変化が 1Hz 程度以上と想定し、その周波数範囲と精度での固有周波数計測に限定したシステムを検討した。

$$\begin{aligned} F_s[freq] &= \sum_i^N \left\{ x_i \times s[floor(mod(\frac{i}{M}, 10))] \right\} \\ F_c[freq] &= \sum_i^N \left\{ x_i \times c[floor(mod(\frac{i}{M}, 10))] \right\} \end{aligned}$$

The diagram illustrates a digital filter implementation using a Cosine Table and a Sine Table. The Cosine Table (Cosテーブル) contains values $s[0]$ through $s[9]$. The Sine Table (Sinテーブル) contains values $s[1]$ through $s[9]$. The input signal $x[n]$ is sampled at $N=10$ points. The output $y[n]$ is calculated as the sum of the input signal $x[n]$ multiplied by the cosine values $s[n]$ and the input signal $x[n]$ multiplied by the sine values $s[n]$.

公益財団法人電気通信普及財団
研究調査助成報告書 第36号 2021年度

図 15 に開発した固有振動数計算アルゴリズムにて解析したシミュレーション結果を示す。図 15 左に示すように通常の FFT 解析での固有振動数計測の結果が 5.5 Hz に対して、図 15 右の開発したアルゴリズムによる結果では固有振動数は 5.4 Hz であった。今回の結果では、通常の FFT 解析の結果と固有周波数がほぼ一致しており、今回の測定データでは誤差 1 Hz 以下での精度で固有周波数が検出できる事がシミュレーションにて確認できた。しかしながら、10Hz 付近では周波数毎の間引き定数の差が少ないため周波数分解能が低下してしまい、検出精度が悪くなる欠点がある。このため、サンプリング周波数を調整するなど、対象とする建造物の固有周波数に応じた調整が必要である。

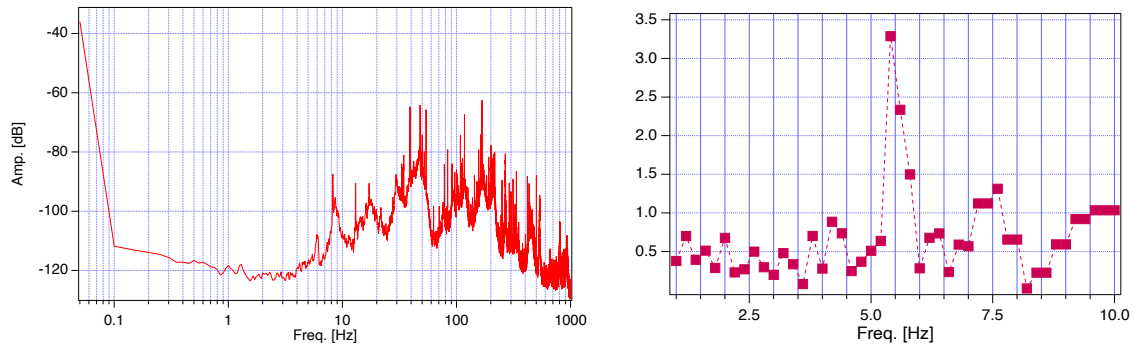


図 15 開発したアルゴリズムによる常時微動計測結果の比較
(左：通常の FFT 解析での結果，右：開発アルゴリズムでの結果)

4-2 MEMS 加速度センサの並列実装によるセンサ開発

本研究調査では、汎用的な MEMS 加速度センサによる建造物モニタリングに向けた要素技術開発として、センサの高感度化に取り組んだ。図 16 に示す一般的な 3 軸加速度センサ（Kionix 社 KXR94-2050）を 2 台使用し、実装方向を反転させることでセンサの高感度化を検討した。図 17 に示すように、2 つの加速度センサを用いて XYZ の 3 軸方向がそれぞれ 6 方向に向くように実装し、それぞれの出力をアナログ演算器にて差分増幅することで XYZ の 3 軸方向の加速度に応じたアナログ信号を出力させる。

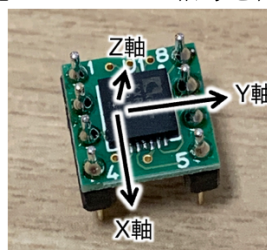


図 16 使用した加速度センサ

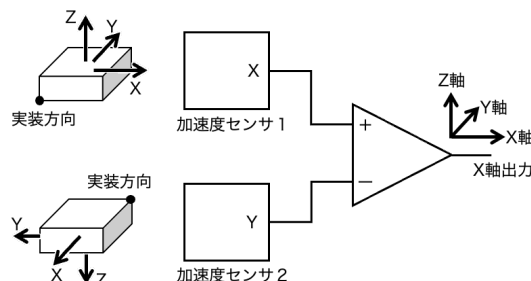


図 17 並列実装による加速度検知

図 18 に、開発した回路をディスクリート部品にて試作したプロトタイプを示す。図 18 に示すように、加速度センサを基板の部品面および半田面に向きを変えて実装することで、それぞれのセンサで 6 方向の加速度情報を得る事が可能である。

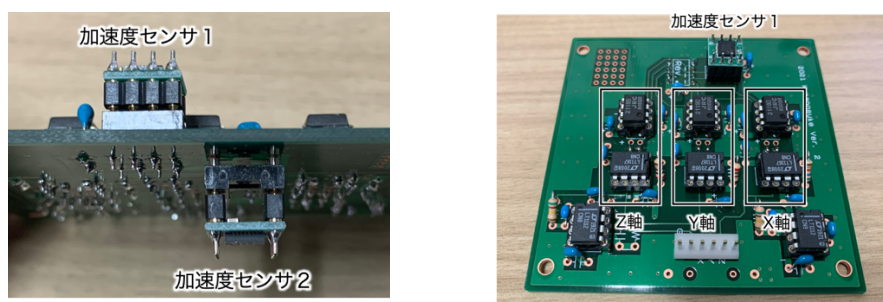


図 18 試作した回路における加速度センサ実装の概要と外観

まとめと今後の計画

本研究調査では、歴史的街並みの長寿命化に向けた地域防災センサネットワークシステムの開発を進めた。歴史的木造建造物を対象とした常時微動計測による建造物の固有振動数計測を実現するシステムを構築し、

(1) 一定期間間隔での建造物の健全性評価と (2) 地震災害発生時における早期の損傷確認に向けた 2 つのシナリオで、開発システムの社会実装評価を実施した。その結果、上記の 2 つのシナリオでの運用を実証でき、平時からの建造物の見守りと地震発生時における早期の損傷確認を可能にした。さらに、地域 BWA 回線を利用したセンサネットワークを構築した事で、地震災害に限らず、近年多発する豪雨等による水害被害など他の災害等の理由による建造物の変化を可視化する事が期待でき、歴史的街並みを有する地域での長期間の見守りと災害時等における脆弱性を補う運用が期待できる。

今後の計画としては、現在も実際の環境下での社会実装評価を進めており、社会実装評価の中でさらに改良を進めていく計画である。さらに、開発したセンサ回路による常時微動計測を評価していく。現状、開発したセンサ回路では常時微動計測においては十分な SN 比が確保できていない。今後、回路と実装方法の改良を進め、建造物 1 軒 1 軒への実装を目指した地域防災スマートセンサネットワークの構築に向けた検討を進めていく。

【参考文献】

- [1] 飯島洋祐, 山口拓海, 横内 基, “伝統的建造物群保存地区の地震防災システムに関する研究,” 電子情報通信学会 2018 年総合大会 2018 年 3 月。
- [2] 岡田 敬一, 森井 雄史, 白石 理人, 少数センサによる建物全層の地震応答推定手法の大型震動台実験データを用いた検証, 日本建築学会技術報告集, 2017, 23 巻, 53 号, p. 77-82, 公開日 2017
- [3] 岡田 隆三, 他 10 名, “軍艦島モニタリングシステムの実装とその運用,” 情報処理学会研究報告 Vol.2017-MBL-84 No.20, 2017.
- [4] 横内 基, 野村 佳亮, 大橋 好光, 北関東の市街地に現存する歴史的建造物の構造特性評価, 日本建築学会技術報告集, 2017, 23 巻, 55 号, p. 881-884, 公開日 2017.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
常時微動計測による木造家屋の損傷と健全性評価に向けた固有振動数検出による木造建造物ヘルスマニタリング回路の開発	多値論理研究ノート 第 43 巻・第 43 回 多値論理フォーラム	2020 年 9 月