

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420581

研究課題名(和文) センサネットワークを用いた地震被災情報収集システムの構築

研究課題名(英文) Seismic Information and Building Damage data Gathering System using OSHW with Wireless Sensor Network

研究代表者

山邊 友一郎 (Yamabe, Yuichiro)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70362762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、オープンソースハードウェア、加速度センサ、角速度センサ及び無線通信デバイスを組み合わせて地震被災情報収集システムを構築し、地震の揺れに関する情報、建物の被害に関する情報を収集するシステムの構築を目指して以下の研究を行った。

無線通信デバイス(XBee)を用いた建物内外での通信実験では、センサノードの通信能力に関して、情報の精度や通信距離に関する知見を得た。

3層の実大鉄骨建物を対象として、振動実験による破壊試験を行い、各種センサを用いた建物被害状況の推定及び、情報収集に関する実験を行った。

研究成果の概要(英文)：This study describes open source hardware with various sensors and a wireless communication system used as a new device to measure the strength of an earthquake and the extent of building damage. The following research was performed.

1. To ascertain the distance at which sensor nodes with XBEE devices can communicate with the server PC, several communication experiments have been performed in different environments.
2. To get technical expertise about estimation of building damage situation and building information gathering system, shaking experiment of actual-size three-story steel building was performed.

研究分野：建築構造・情報学

キーワード：建物被害情報 センシング センサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

地震などの大規模災害の発生直後には、被災地域の情報を迅速に収集して災害対策に活用することが求められる。しかし、地震の揺れを原因とする停電や通信網の断線、通信施設の被害などにより通信手段が途絶してしまい、必要な情報収集が不可能となる状況が生じてきた。

本研究では、簡便なセンサネットワークを用いて地震発生直後に各地で観測される揺れの強さや建物の被災の程度に関する情報を収集し、自治体による迅速な住民の救助活動、消防活動の初動体制構築に役立つ情報を提供できるシステムの構築を目的とする。背景として、上述したような、地震直後の情報収集の困難さがあると共に、近年の情報通信技術 (ICT) の発展がある。特に、マイクロコンピュータ技術の発展と普及が背景にあり、市販のマイクロコントローラシステムにセンサ及び無線通信機器を接続することで、利用者がプログラムを書き込んでカスタマイズ可能なセンサノード (センサ及び無線通信機能を有する単位ユニット) を安価かつ容易に導入可能な環境が整いつつある。建築分野でも、無線センサネットワークを活用する研究が計画・構造・環境の各分野で積極的に行われており、最近では、一般家庭でもセンサノードを設置して、各種モニタリングを実施することが現実味を帯びてきている。研究代表者は、ユビキタスな建築構造ヘルスマニタリングを実施する構想を提案し、加速度センサや角速度センサを用いた建築構造の性能モニタリングを実現するために、種々の基礎的検討を進めてきた。また、研究代表者も所属する日本建築学会・情報システム技術委員会・スマート建築モニタリング小委員会でも、建築の各分野について活発な研究活動を実施しており、本研究ではその延長線上として、より簡便かつローコストなセンサネットワークを構築して、地震被災情報を提供するシステムの構築を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、住戸単位でセンサノードを設置し、揺れの強さや被災の程度に関する情報を観測・収集するシステムの構築を目指す。現状では、ほぼ例が無いシステムであるため、基礎的な部分から開発を進めていく必要がある。以下の事項を研究期間内に明らかにすることを目標とする。

- (1) 簡便かつローコストなセンサノードの製作：無線通信機能を持つマイクロコントローラシステムを用いて基本的なセンサノードを構成する。センサノードに各種センサを接続することにより、観測地での揺れの強さや被災の程度を観測するが、そのために必要なセンサの種類や計測精度を検証する必要がある。尚、本研究では住戸単位でセンサノードを設置することを想定するため、センサノード

ードのコストを最小化することも目指し、最終的には1万円程度以下で製作可能な仕様とする予定である。

- (2) センサノードの設置位置、サーバとの通信環境に関する検討：センサノードは観測した情報をサーバに送信する必要があるが、正確な情報送受信が可能な通信環境を実現するために、センサノードとサーバ間の距離や遮蔽物の影響を検討する必要がある。また、停電時にも運用可能な無線センサネットワークを構成するためには、センサノード間のアドホックな通信 (各センサノード自身が自律的にルーティングを行うマルチホップ通信) を確保する必要があるため、センサノード間の距離や設置位置に関する検討も行う予定である。

3. 研究の方法

- (1) 簡便かつローコストなセンサノードの仕様を決定する。マイクロコントローラシステムには、Arduino という製品を利用し、これに無線通信機能を付加するために、XBee という無線モジュールを接続する。両者を用いることにより、プログラムでカスタマイズ可能な無線通信環境をローコストで製作することができる。本研究では、1軒の住戸に1つのセンサノードを設置することを想定するが、住戸での揺れの強さや被災の程度を観測するために、3軸の加速度センサ、角度センサ、距離センサを用いることを想定する (図1参照)。加速度センサを用いることにより、地震発生時の最大加速度を記録して、揺れの強さのレベルを観測するとともに、得られた加速度波形から計測震度の目安を算出することが可能になる。また、建物の被災情報を入手するために、建物外壁あるいは柱などに角度センサを設置し、地震後の建物の残留変形角を計測し、床レベルに距離センサを設置することで天井との距離を計測し、建物の残留変形による距離の変化を計測することにより、被災情報を観測することも可能となる。

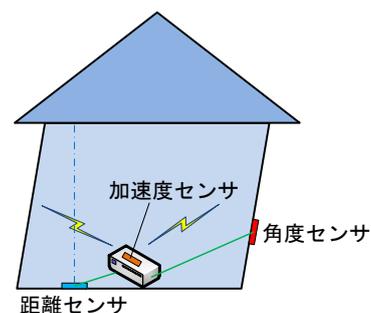


図1 センサノード及びセンサ

(2) シンプルなセンサネットワークとして、基地局無線モジュールを接続したコンピュータ（サーバ）1台とセンサノード1機を配置したシステムを構築する。各種センサを有するセンサノードは地震発生時に被災情報を観測し、サーバに情報を発信する。サーバは受信した情報をもとに解析を行い、最大加速度、計測震度、被災の程度に関する情報を住宅所有者にメールで送信する機能をプログラムする。本システムにより、住宅所有者は留守にしていたとしても、外出先で自宅が存在する場所で発生した地震による被災情報をピンポイントで入手することが可能となり、自宅の安全性の把握、救護の要請などが可能となる。ここでの検討課題としては、①センサノードの設置位置、②センサノードへの電源供給方法、③センサノードの耐久性、メンテナンス、④センサノードとサーバ間の情報送受信の正確性などがある。

(3) 強い揺れに見舞われた地域では電力が遮断される可能性があり、その場合、サーバは機能せず、情報の外部への発信が不可能となる恐れがある。そこで、自治体レベルでの地震被災情報収集システムを構築する。本システムでは、1軒の住宅に1つのセンサノードを配置することは同じであるが、耐災害性能を向上させたサーバ（以下、基幹サーバと呼ぶ）を一定の広さの地域に1つ配置し、複数のセンサノードと通信させる仕組みを想定する（図2参照）。基幹サーバは耐震性に優れ、停電時にも動作可能なバッテリー機能を持ち、自治体の災害対策部局と災害時にも通信可能な強靱な専用ネットワーク回線を持つものとする。また、各センサノードはXBeeの持つアドホックなネットワーク構築機能を利用し、自律的にネットワークを形成することにより、基幹サーバまでの通信経路を確保する。本システムを運用することにより、自治体への情報提供も可能となり、自治体の災害担当部局では、管轄する地域での各住宅敷地を最小単位とした地震の揺れの強さ、被災情報を入手可能となり、消防、救急部局と情報を共有し、迅速かつ綿密な災害対策を講じることが可能となる。ここでの検討課題としては、①センサノード間の通信の可否、②アドホックネットワーク構築の正確性、③センサノードから送信する情報の混信の有無、④基幹サーバの設置位置（通信可能なセンサノードの台数及び、対象エリアの面積）などがある。

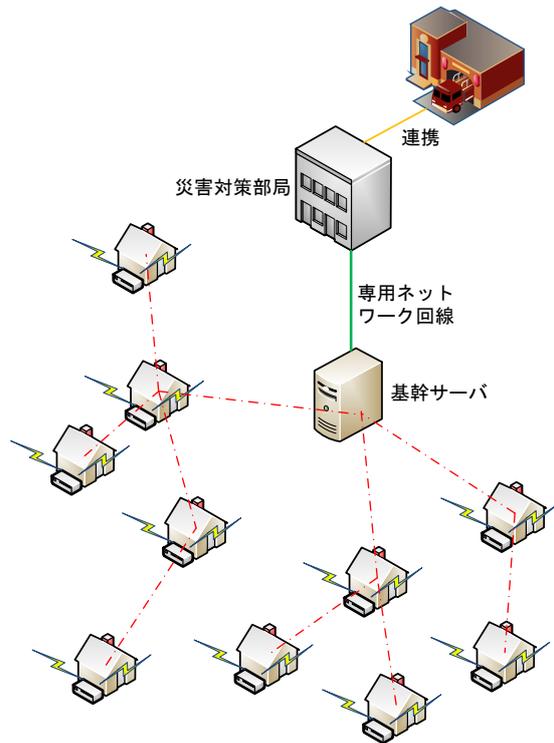


図2 地震被災情報収集システム

4. 研究成果

(1) XBeeを用いた建物内外での通信実験

① 屋外での通信実験：図3に実験の概要を示す。見通しの良い公園でセンサノードを固定し、受信装置を持った観測者がセンサノードから徐々に離れていきながら、通信データの正確性を検証した。通信データは、通し番号付きの3軸の加速度データであり、スペースを含めて28文字分の情報量である。また、データ送信間隔は33, 34, 35, 36, 100msecの5種類とした。通信性能については、1,000回のデータ送信を1単位として、データ送受信が正確に行われた割合を百分率で示した値を通信成功率と定義する。図7に、横軸にセンサノードと受信装置との距離をとり、縦軸に通信成功率、データ送信間隔をパラメータとして実験を行った結果を示す。実験結果より、通信可能な距離の上限は100mであった。データ送信間隔については、35msec以下では通信が不安定であったが、36msec以上では、ほぼ100%の通信成功率となった。成功率に関しては、ある距離を境に急激に低下する傾向があった。

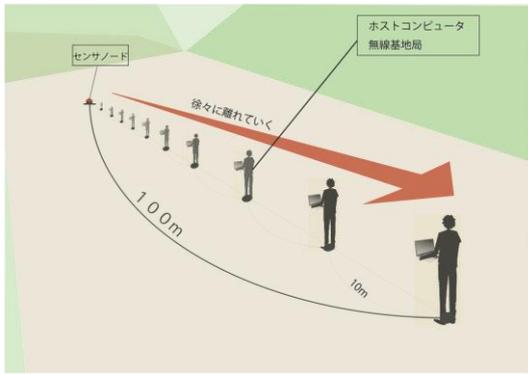


図3 実験概要（屋外）

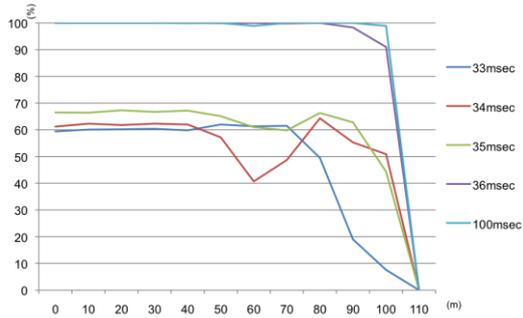


図4 実験結果（屋外）

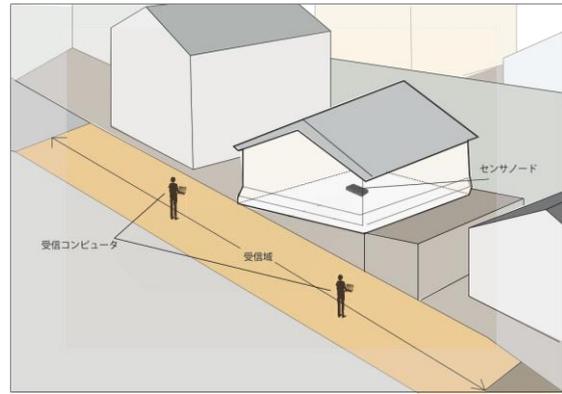


図7 実験概要（住宅内外）

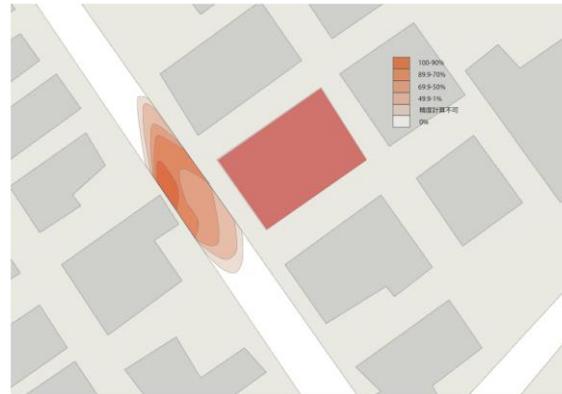


図8 実験結果（住宅内外）

- ② **住宅内外の通信実験**：図7に実験の概要を示す。木造軸組工法2階建て住宅の屋内中心付近にセンサノードを設置し、住宅外部への通信能力を検証する。敷地周辺は住宅が建て込んでいる地域である。データ量、データ送信間隔は①と共通であり、100msecで行った結果のみを図8に示す。結果より、通信成功率が90%以上となる範囲は非常に少なく、木造住宅であっても建物の壁越しにデータをやり取りすることの難しさを示す結果であった。

- ③ **建物内部での通信実験**：大学の研究棟内部で通信実験を行った。図9に実験を行った建物の廊下の写真を示す。間仕切りはスチール製で、所々にガラス窓がはめられている。室内の小型振動台上にセンサノードを設置し、振動台を揺らして得られる加速度を送信データとする。データ送信間隔は100msecで行った結果のみを図10に示す。オレンジ色の濃淡が通信成功率の高低と対応する。また、灰色の場所は立入ができず、実験ができなかった場所を示す。距離が離れるほど通信成功率が低下する傾向は他の実験と共通であった。この実験の特徴的な結果としては、直線状の廊下では70%以上の通信成功率があったとしても、直角に曲がると（間仕切りのないオープンスペース）通信成功率が0%になる現象が観測されたことである。



図9 実験場所（建物内部の廊下）

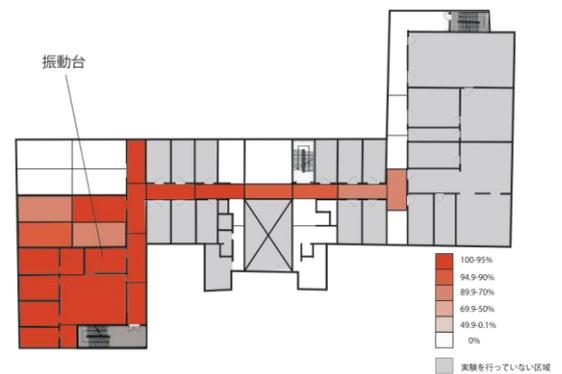


図10 実験結果（建物内部）

(2) 実大建物での振動実験

- ① 本実験は、鉄骨造3層試験体(図1.1参照)に入力レベルの異なる地震波を繰り返し入力して試験体の損傷状況を確認したものである。試験体には、各階床中心位置に加速度センサを設置し(図1.2参照)、1,2階柱及び梁端部に角速度センサを設置して(図1.3参照)計測し、揺れが収まった後センサノードから図1.1中赤丸で示した受信位置に情報を送信する実験を行った。図1.4に計測システムのフローチャートを示す。各センサノードは電源が入ると待機モードに入る。待機モードでは、決められたサンプリング間隔で加速度及び角速度を計測する。実験が開始され、試験体に変形が生じることによりトリガー1に設定された基準値を超える値が計測されると、記録モードに入り、計測値をSDカードへ記録する。記録モードは、トリガー2で設定された基準値を下回る状態が2分継続したと判断されるまで継続し、観測値をSDカードに記録し続ける。トリガー2により揺れが収まったと判定されると、センサノードは記録モード中に計測したデータの最大値を無線によりデータ送信を行う設定とした。



図 1.1 試験体と受信位置

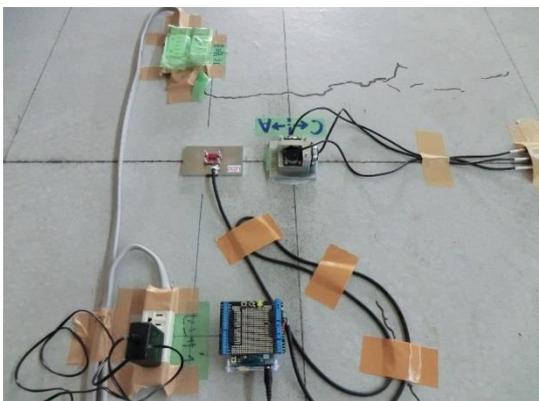


図 1.2 加速度センサ設置状況



図 1.3 角速度センサ設置状況

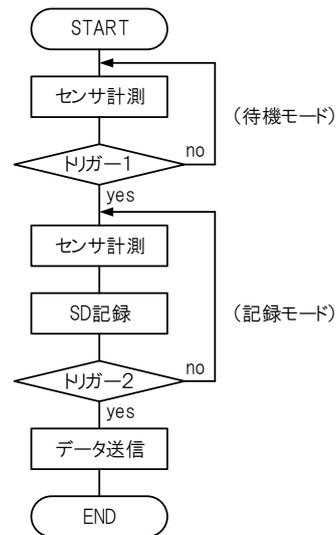


図 1.4 計測システムのフローチャート

- ② Xbee による無線通信状況について: 表 8.3-1 に Xbee 無線通信の成否を示す。表より、無線通信の成功率は約 76%であった。本研究では、各センサから計測データをサーバに直接受信する方式としたが、2階の1通に設置した G05 では 100%の受信率だったが、2階梁の2通東側に設置した G07 では成功率は約 50%となり、通信状況に大きな差が見られた。これは、障害物の有無や受信位置が影響したためと考えられる。
- ③ 固有周期の変化について: 元データ (A01, A02) を FFT 解析することで固有周期を求めた。また、比較データについても同様に固有周期を算出し、その結果と比較を行った。なお、FFT 解析に用いるデータは、フィルタ処理等は行わず、計測された原波形を用いた。図 1.5~1.7 に、元データ及び比較データの一次、二次、三次の固有周期の比較を示す。図より、元データと比較データを用いた FFT 解析結果による固有周期は、値、定性的傾向共に一致しており、十分な精度を有していることがわかる。鷹取 100%加振時ま

では一次固有周期，二次固有周期，三次固有周期共に，周期は長くなり，損傷が進んでいることがわかる。また，その後の南海 50%から南海 150%加振時では，鷹取 100%加振時と比べると，若干固有周期は短くなるがほぼ一定の値となっており，鷹取 100%加振時に破断などの大きな損傷が建物に発生し，それ以降は損傷が進展していないと判断することができる。

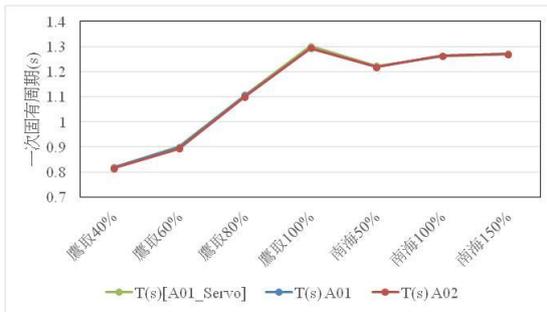


図 1 5 建物の一次固有周期の変化

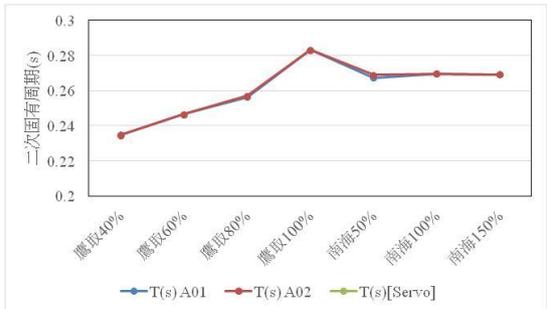


図 1 6 建物の二次固有周期の変化

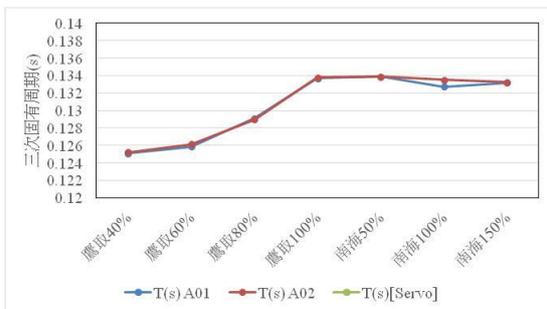


図 1 7 建物の三次固有周期の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① Qi Liang, Akinori Tani and Yuichiro Yamabe: Fundamental Tests on a Structural Health Monitoring System for Building Structures Using a Single-board Microcontroller, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 663-670, 2015, 査読有
- ② Yuichiro Yamabe, Hiroto Sasaki, Tatsuya Inatome, and Akinori Tani: Fundamental Test of Seismic Information and Building Damage Data

Gathering System using OSHW with Wireless Sensor Network, Proc. of the 2014 ICCCB, pp.1158-1165, 2014, 査読有

- ③ Qi LIANG, Akinori TANI and Yuichiro YAMABE: Fundamental Study on Structural Health Monitoring System using Single-board Microcontroller with Acceleration Sensors, Proc. of the 6WCSCM, pp.1-9, 2014, 査読有
- ④ 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎: OSHW を用いた建築構造性能モニタリングシステムに関する研究—オープンソースハードウェアの計測性能の比較検討—, 第 37 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(論文), pp. 121-126, 2014, 査読有
- ⑤ 古泉一希, 谷明勲, 山邊友一郎: オープンソースハードウェアを用いた構造モニタリングに関する研究—実大 3 層鉄骨構造物の計測実験—, 第 37 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(論文), pp. 127-132, 2014, 査読有

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 山邊友一郎, 谷明勲: センサネットワークを用いた建物情報収集システム, 電子情報通信学会技術研究報告「知的環境とセンサネットワーク」(依頼講演), pp. 31-34, 2015. 5. 14, 東京電機大学(東京都)
- ② 山邊友一郎, 稲留達也, 谷明勲: センサネットワークを用いた地震被災情報収集システム—無線通信能力に関する基礎実験—, 第 37 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), pp. 307-310, 2014. 12. 12, 日本建築学会建築会館(東京都)
- ③ 山邊友一郎, 佐々木宏仁, 平賀隆, 谷明勲: センサネットワークを用いた地震被災情報収集システム—構想と基礎的实践—, 2013 年度日本建築学会大会(北海道)情報システム技術部門研究協議会資料(93 頁), pp. 16-21, 2013. 8. 30, 北海道大学(北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山邊友一郎 (YAMABE YUICHIRO)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70362762