

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510201

研究課題名(和文) 建築構造物性能みまもりシステムの構築

研究課題名(英文) System construction on structural performance monitoring system of buildings

研究代表者

谷 明勲 (Tani, Akinori)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50155199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000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(OSHW)や安価なデータロガーと種々のセンサを用いた建築構造物性能みまもりシステムに関する検討を行った。ここでは、まず、加速度センサ、ジャイロセンサを用いた計測精度の検証を行った。さらに、加速度センサとOSHWを用いた建築構造物性能みまもり試作システムを構築し、その基本性能を振動台実験により検証した。この試作システムでは、各種構造物性能のモニタリング可能で、メールで応答状況を送信するシステムを構築した。以上より、試作システムは実際の建築構造物性能モニタリングに適用可能であることを明らかにし、試作システムを実際の建築物に適用した実証実験も実施した。

研究成果の概要(英文)：Here, researches on a structural performance monitoring system using open source hardware (OSHW), data logger and some sensors are performed. At first, measurement accuracies of acceleration and gyro sensors are performed. Using obtained results, a prototype system is developed using selected acceleration sensor and OSHW. This prototype system can monitor structural performances such as accelerations, displacements, and natural periods, and obtained results can be sent by e-mail. Fundamental tests on this prototype system are performed using shaking table tests. Finally, it is clarified that this prototype system is applicable to structural performance monitoring system by obtained results. Furthermore, this prototype system are applied to real buildings, and continuous structural performance monitoring is also performed.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会システム・安全システム

キーワード：建築構造物性能 性能モニタリング OSHW 加速度センサ ジャイロセンサ

1. 研究開始当初の背景

(1)本研究は、センサネットワーク等を用いたユビキタスな建築構造性能みまもりシステムの構築を目的とする。

近年、パッシブ型無線 IC タグを用いたユビキタスな情報マネジメントに関して、種々の実証実験が経済産業省を中心として行われている。パッシブ型無線 IC タグは、種々の性能を持つ物が開発・市販されており、建築物の構造性能の収集に関しては、研究担当者らが地震時の人命救助への RFID の応用性に関する検討が、鉄筋コンクリート構造物の亀裂発生検出に適用した研究が独立行政法人建築研究所を中心に行われている。一方、センサ付き無線 IC タグに関しては、温湿度センサ付きのものが数種類市販されているが、他のセンサ付き無線 IC タグに関してはほとんど開発が行われていない。センサ付き無線 IC タグを用いて建築物の構造性能を把握するためには、既往の検討から、セミパッシブ型が適切であると考ええる。セミパッシブ型では、電池は主にセンサのみに使用され、計測データ転送信号が送られた場合のみデータ転送を行うため、寿命の長い建築構造物への適用に適していると考ええる。しかし、建築構造物の構造特性のモニタリングに適用可能なセンサ付きセミパッシブ型無線 IC タグは見られず、同様の特性を有するモニタリングシステムを開発する必要がある。

(2)近年、種々のセンサが安価で容易に入手できるようになり、これらのセンサを接続可能な OSHW(Open Source Hardware)や、加速度センサ付きデータロガーが開発され、これらについても容易に入手できるようになっている。このような状況をふまえ、建築物構造性能のみまもりを行うために必要となる基本的な機器が使用可能な状況となっており、建築構造分野における性能モニタリングを安価で簡便に実施し、このようなシステムを普及・拡大できる状況にあると考ええる。

2. 研究の目的

(1)本研究は、各種センサと OSHW、無線 LAN 等を用いたセンサネットワークの建築性能モニタリングへの適用性に関して、市販されて容易に入手可能なセンサ特性と種々のネットワークシステムを用いた基礎実験を行い、その適用性を実証的に検討し、一般住民への情報開示を目的とする点に独創性と特色を有し、既往の研究で、本研究実施に必要な基礎的知見は既に得られている。

また、建築構造物の地球環境問題への適応策として、建築物の長期間の安全・安心な使用が求められているが、これを実現するためには、建築物の有する構造性能を一般住民に開示し、必要に応じた適切な補修・改修を行う必要がある。しかし、現状は構造性能の劣化に対する一般住民の意識は低く、一般住民への適切な啓蒙活動と情報開示が必要不可

欠と考える。センサネットワークを用いれば、データの収集が容易で、柱・梁部材のように、天井や壁などで隠蔽された部分でも、容易にモニタリングを行える可能性を有している。

(2)最近では、種々のセンサネットワークシステムの試作機の開発が進められており、今後、建築性能モニタリングに必要な建築固有の機器仕様を明らかにすれば、低価格でユビキタスな性能モニタリングシステムを構築できる大きな可能性を有している。以上のように、センサネットワークを用いた構造性能モニタリングは、現在発展中の ICT であるが、その発展は非常に早く、緊急に建築構造物への応用に関する研究を実施していく必要があると考え、本研究を計画した。

3. 研究の方法

(1)建築物の性能モニタリングに必要な加速度センサ、ジャイロセンサを選定し、その基本的特性を明らかにするとともに、必要となる性能を実験的に明確化する。

(2)建築構造物の性能モニタリングに関するプロトタイプシステムの構築を行い、実験室や大学構内の建物を対象とした実証の実験を実施し、インターネットを用いた情報収集システムのプロトタイプシステムの構築を行う。

(3)情報収集システムで収集されたデータを基に、建築物の構造安全性に関する安全情報を一般住民に開示し、専門家に対しては、建築物の構造被害状況を迅速に把握できるプロトタイプシステムの構築を行う。

4. 研究成果

(1)OSHW と加速度センサを用いた検討

OSHW では、Arduino を筆頭に、種々の性能を有する OSHW が市販され利用可能となっている。ここでは、この内、(a)Arduino Uno R3、(b)GR-SAKURA、(c)FRDM-KL25Z の 3 種の OSHW に同じアナログ型加速度センサ(入力電圧 3.3V、感度 800mV/g)を接続し、小型振動台を用いて計測精度の検証を行った。図 1 に振動台実験の概要と 3 層供試体を示す。

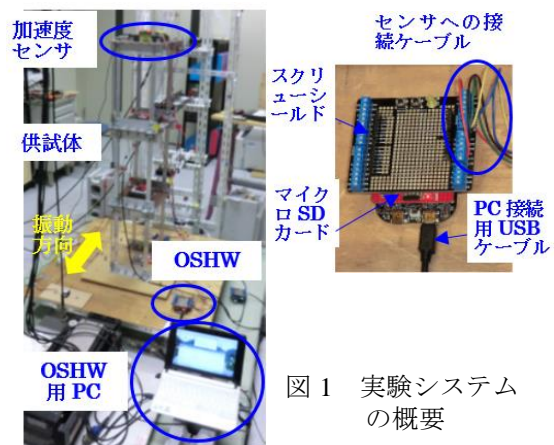


図 1 実験システムの概要

表 1 に OSHW のスペックの一覧を示す。表 2 に、レファレンスとして用いた高精度加速度センサ(感度 1200mV/g)との最大加速度の計測誤差を、表 3 に、実験の計測結果を FFT 解析して得られた固有周期の一覧を示す。

表 1 OSHW スペック一覧

	Arduino Uno R3	GR-SAKURA FULL	mbed FRDM KL25Z
作動電圧	5V	3.3V	5V
MCU	ATmega328	RX63N	Freescale KL25Z
Clock	16MHz	96MHz	48MHz
Flashメモリ	32KB	32KB	128KB
SRAM	2KB	128KB	16KB
Interface	インターネット対応	インターネット対応	インターネット対応
	USBファンクション/ホスト機能	USBファンクション/ホスト機能	USBファンクション/ホスト機能
	-	Micro SD	MMA8451Q on-board
	Arduino Uno R3 Pin-compatible		
アナログ入力: 6 (10bit)	アナログ入力: 16 (12bit)	アナログ入力: 6 (16bit)	
OS	Arduino IDE	クラウドWebコンパイラ	mbed Online Compiler

表 2 加速度計測誤差一覧

Sampling Interval (ms)	Arduino Uno		GR-SAKURA		FRDM-KL25Z	
	Max(%)	Min(%)	Max(%)	Max(%)	Min(%)	Max(%)
10	3.60	1.57	2.05	2.35	2.12	6.92
20	6.67	1.91	1.52	14.83	3.56	2.06
30	4.80	1.55	2.90	11.42	2.69	2.83

$$\text{Error} = \frac{\text{OSHW の計測結果} - \text{レファレンスの計測結果}}{\text{レファレンスの計測結果}} \times 100(\%)$$

表 3 固有周期算定誤差一覧

Earthquake	El Centro	Taft	Hachinohe	JMA Kobe	
Period (s)	Arduino Uno				
Error (%)	1st	0.466	-1.31	0.163	-0.227
	2nd	-0.358	0.000	0.163	-0.227
	3rd	-0.068	-0.114	-0.091	-0.114
Period (s)	GR-SAKURA				
Error (%)	1st	0.466	0.584	0.000	1.241
	2nd	-0.358	0.000	0.163	-0.162
	3rd	0.000	-0.114	-0.091	-0.045
Period (s)	FRDM-KL25Z				
Error (%)	1st	0.466	0.444	-23.156	11.838
	2nd	0.163	0.000	0.000	-0.227
	3rd	0.000	-0.251	-0.250	-0.250

$$\text{Error} = \frac{\text{OSHW の FFT 解析結果の固有周期} - \text{レファレンスの FFT 解析結果の固有周期}}{\text{レファレンスの計測結果 FFT 解析結果の固有周期}} \times 100(\%)$$

以上より、以下のことが明らかとなった。
 ・本研究で用いた、3種の OSHW は、サンプリング間隔が 10, 20, 30ms のいずれの場合でも、データの欠測は見られず、建築構造的な性能まもりシステムに使用可能と考える。
 ・但し、AD 変換がシリアルに行われるため、サンプリング間隔以上のデータ処理時間を要する場合もあり、今後の検討が必要となる。
 ・今回用いた OSHW の ADC の精度は 10, 12, 16bit で異なるが、計測精度に対する影響は小さく、CPU の作動 Clock の影響も小さい。
 ・OSHW での計測にノイズが見られる場合があり、センサ接続方法に検討が必要となる。
 ・OSHW 毎に、開発環境やライブラリが異なり、プログラム手法に処理時間が大きく依存するため、その検討が必要となる。

(2) 小型加速度ロガーを用いた検討

次に、図 2 に示す小型加速度ロガーとシステムを用いて、OSHW を用いた場合と同様の検討を行った。なお、供試体は 1 層とした。表 4 に加速度ロガーと、OSHW で用いた加速度センサ(三軸加速度センサ±2g, AD 変換 16bit)と 16bit データロガーを用いて計測結果から算出した変位と、レーザ変位計による計

測結果の誤差の一覧を示す。

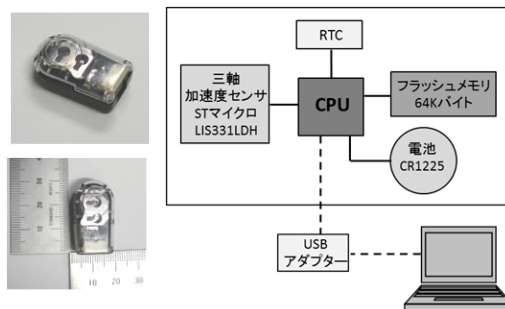


図 2 加速度ロガーと実験システム

表 4 加速ロガーによる変位算定誤差一覧

入力地震波	誤差*	加速度センサ	加速度ロガー
JMA Kobe	Max(%)	4.32	1.44
	Min(%)	9.15	9.05
Taft	Max(%)	2.75	2.58
	Min(%)	2.15	2.42
Hachinohe	Max(%)	2.25	8.11
	Min(%)	3.39	0.62

*レーザ変位計で求めた、正・負の最大応答値に対する誤差

以上より、ここで用いた小型化速度ロガーも、建築構造的な性能まもりシステムに適用可能で、地震時の加速度応答だけではなく、応答変位についても若干の誤差はあるが、算出可能であることもわかる。

上記の結果を踏まえ、図 3 に示す研究室に上記システムを設置し、24 時間の常時加速計測を行っている。ただし、常時計測開始以後、大きな地震は発生していないため、加速度ロガー設置建物の振動特性はまだ行っていない。また、常時微動として±15gal 程度の加速度波形は得られているが、この程度の常時微動では、構造特性の同定は難しい事もわかった。今後、ある程度の地震動の計測結果が得られた段階で、ロガー設置建物の構造特性の同定を行う予定である。

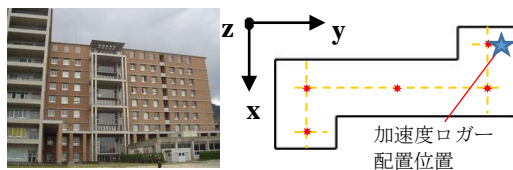


図 3 常時計測実施建物と位置

(3) ジャイロセンサを用いた検討

加速度センサの計測結果から構造物の応答変位を算出する場合、計測結果に適切なフィルタリング処理を行う必要がある。このため、ここでは、簡便な変位計測を目的として、ジャイロセンサを用いた変位計測に関する検討を行った。図 4 に、ジャイロセンサを用いた実験装置の概要を示す。また、実験計測システムを図 5 に示す。

この実験装置は、剛体運動する天板を、上下にユニバーサルジョイントを設けた 4 本の

柱で基盤に接続し、外周フレームと天板に接続した4本のバネで剛性を付与している。これより、この供試体は、人力加振により種々の加振を行うことが可能となっている。

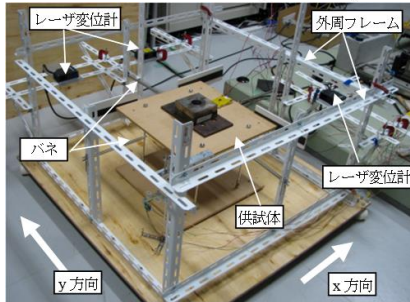
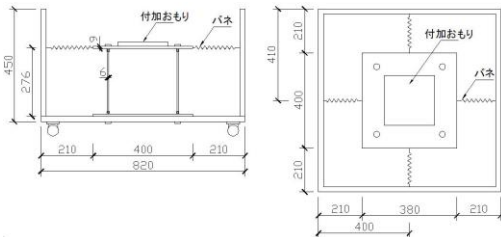


図4 ジャイロセンサを用いた実験装置

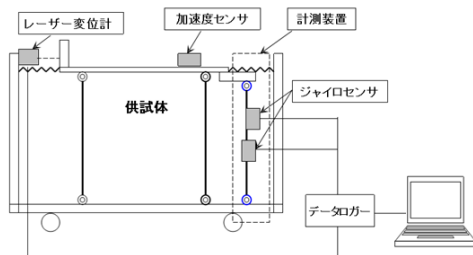


図5 ジャイロセンサ実験計測システム

ジャイロセンサでは、角速度を検出し、得られた結果に計測時間間隔を乗ずれば角度が算出できる。このため、本実験で設置したジャイロセンサから得られた角度を基に応答変位の算出式を誘導すれば、フィルタリング処理なしに、応答変位の算出が可能となる。

図6に、円方向加振の場合のx方向の応答の時刻歴とx-y平面上の変位軌道を示す。

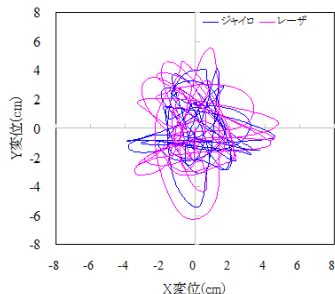


図6 x-y平面の変位軌道(円方向加振, Case2)

また、表5に計測誤差の一覧を示す。なお、ここでは、供試体の固有周期を、Case1:x方向0.598s,y方向0.597s,Case2:x,y方向1.19sと変化させて実験を行った。

以上より、以下のことが明らかとなった。
 ・ジャイロセンサで計測した角速度から傾斜

表5 変位計測誤差の一覧

振動方向	Error(Case1)		Error(Case2)		
	x(%)	y(%)	x(%)	y(%)	
X	Max	-7.74	17.4	-0.651	12.3
	Min	-0.0132	17.7	-2.04	-19.5
Y	Max	23.7	3.47	-4.39	6.37
	Min	-2.40	-0.176	-27.6	1.96
斜	Max	0.892	0.229	-15.1	-2.16
	Min	-19.1	6.97	-7.97	3.58
円	Max	3.12	14.0	4.57	25.1
	Min	7.58	0.974	-13.2	13.2

角を算定し、その値を用いて算出した応答変位の計測精度が把握できた。

・供試体の応答をx,y方向の2成分に分解して計測することで、様々な方向に振動する供試体の応答変位を計測でき、x-y平面上での応答変位の軌道も求められた。

・ジャイロセンサによる計測精度では、誤差が大きい場合も見られたため、ジャイロセンサの計測装置の見直しや感度等に関する検討を、更に検討を行う必要がある。

・これより、ジャイロセンサは加速度センサと同様に建築構造性能みまもりシステムに適用可能と考える。今後は、ジャイロセンサ、加速度センサの適切な適用可能範囲を明確にし、各センサの特徴を生かしたシステム構築考えていく必要がある。

(4)鉄骨破断の検出に関する検討

ジャイロセンサは、建築構造物の応答変位算出に適用可能であることを示したが、これまでの検討は、構造物全体の構造特性のモニタリングで、構造部材の損傷検出は検討していない。ここでは、建築構造物の内、鋼構造骨組の鉄骨大ばり破断検出へのジャイロセンサの適用性に関する検討を、図7に示す実験システムを用いて行う。ここでは、鉄骨H形鋼大ばりを想定した供試体を蝶版で底板に接続し、反対側の浮き上がりをジャイロセンサで計測するものとした。

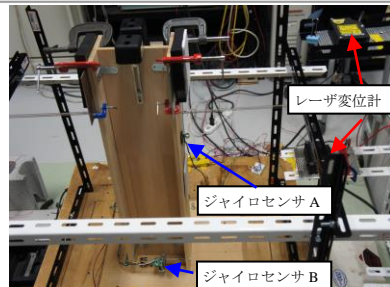
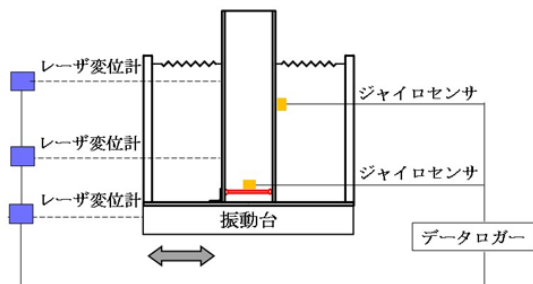


図7 梁破断検出実験システムの概要

図8に、供試体下端部の浮き上がり計測結

果の例を、レーザ変位計の計測結果から求めた結果と比較して示す。得られた結果より、角度の変化が検出されたときをフランジの破断と見なせば、ジャイロセンサによる計測結果を用いた H 形鋼はりフランジの破断検出は可能と考える。さらに、この実験結果を基に、2013 年度に兵庫県、防災科学技術研究所との共同研究で実施した、実大鉄骨構造物振動台実験のはり破断検出に、Arduino とジャイロセンサを用いたシステムを適用し、ジャイロセンサの設置位置を検討する必要があるが、提案システムで鉄骨大はり破断の検出が可能で、提案システムが部材破断等の部材損傷検出に適用できることを示した。

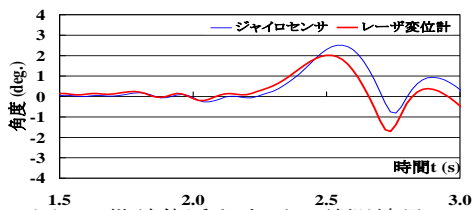


図 8 供試体浮き上がり計測結果

(5)建築構造性能みまもりシステムの試作

ここでは、OSHW と加速度センサを用いた建築構造性能みまもり試作システムの構築を行った。図 9 に試作システムの外観を、図 10 に試作システムのフローを示す。

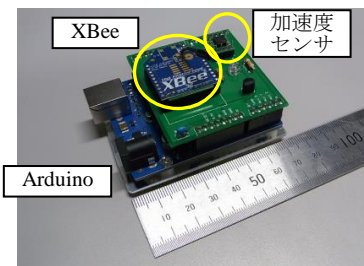


図 9 建築構造性能みまもり試作システム

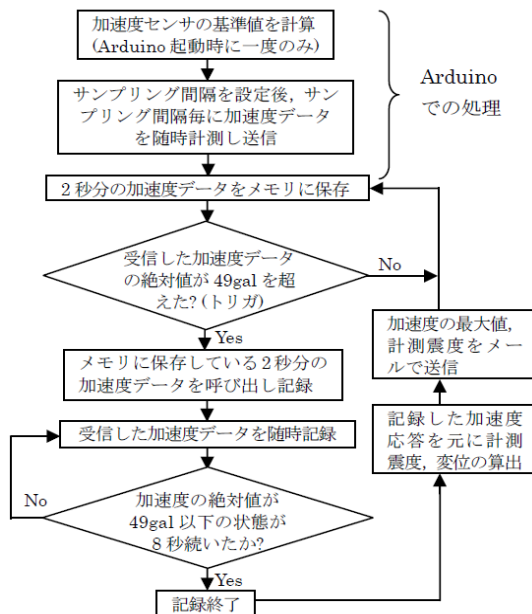


図 10 試作システムのフロー

この試作システムでは、OSHW として Arduino を、データ通信には USB シリアル通信と Xbee(Zigbee による無線通信システム)、感度 1000mV/g、入力電圧 5V の加速度センサを用いて構築した。Arduino 上のシールドに設置した加速度センサは、計測間隔 40ms で計測したデータをホストコンピュータに送信し、ホストコンピュータ側では、計測値がトリガ値を超えた場合に計測を開始し、計測値が一定値以下の状態が 8 秒継続するとデータ収集を停止する。その後、計測データの FFT 解析を行い、最大加速度、計測震度、最大応答変位をメールで送信する。

3 層供試体を用いた振動台実験で得られた結果を基に算出した 3 層天版の基礎からの応答変位の時刻歴をレーザ変位計の計測結果(計測した変位)と併せて図 11 に示す。また、図 12 に、計測結果のメール送信画面を示す。

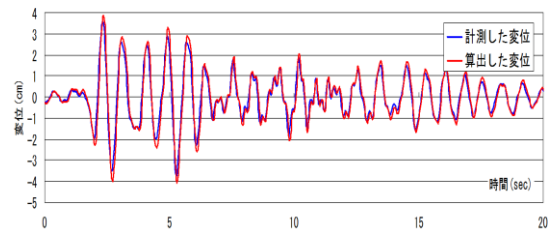


図 11 3 層天版の基礎からの応答変位



図 12 メールによるデータ送信画面

試作システムを用いた基礎的検討より、以下のことが明らかとなった。

- ・試作システムで設定可能な最小のサンプリング間隔は、Xbee によるデータ通信時間から 40ms となり、データの読み飛ばしや欠測など、データ送信に問題はなかった。
- ・試作システムの加速度応答の計測は、データロガーで計測した加速度応答に対して 8~29% の誤差が見られたが、振幅、位相の差は小さく、ほぼ一致した波形となった。
- ・試作システムで計測した加速度応答を、フィルタ処理後に二階積分をすることで、位相、振幅共にレーザ変位計の計測結果に近い変位波形が得られた。ただし、フィルタ特性については、今後さらに検討を行う必要がある。
- ・試作システムの計測結果から計測震度を算出可能で、算出結果はデータロガーと試作システムの差は小さかった。
- ・ホストコンピュータがインターネットに接続されていれば、試作システムの計測終了後に最大加速度、計測震度、最大変位等の情報を、電子メールによって送信できる。
- ・以上より、試作システムのように安価なシステムでも、十分に地震情報を収集でき、建築構造性能みまもりシステムとして使用可

能であることが明らかとなった。また、同様のシステムを用いて戸建て住宅の 24 時間常時観測も実施しているが、計測開始以後大きな地震動が計測されておらず、地震動計測結果が得られれば、戸建て住宅への本システムの適用性についても検討を行う予定である。

(6)まとめ

以上、本件研究課題について設定した 3 つの研究目的に関しては、当初の目的をほぼ達成できたと考え、日本には多くの戸建て建築物や集合住宅が存在し、今後、より多くの建物からの情報が得られるようになると、ビッグデータとしてのデータ収集・分析・開示方法の検討が必要となり、これらの課題を含めた建築構造性能みまもりシステムの構築とその普及が重要な課題であると考え。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Qi LIANG, Akinori TANI and Yuichiro YAMABE, Fundamental Study on Structural Health Monitoring System using Single-board Microcontroller with Acceleration Sensors, Proceedings of 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, 梗概査読有り, 2014, pp.1-9 (採用決定)
- ② LIANG Qi, MATSUZAWA Takahiro, TANI Akinori and YAMABE Yuichiro, Fundamental Tests on Structural Performance Monitoring System of Building Structures Using Gyro Sensor, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, USB Memory, Paper ID:1296, 梗概査読有り, 2012, pp.1-8
- ③ 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎, センサを用いた建築構造モニタリングに関する研究—ジャイロセンサによる変位計測法の提案と精度の検証—, 日本建築学会・第 34 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 査読有り, 2011, pp.91-96

[学会発表] (計 8 件)

- ① 谷明勲, 山邊友一郎, 梁琪, オープンソースハードウェア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—, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114, No.65, 知的環境とセンサネットワーク研究会, ポスター番号 15, 査読無し, 2014.5.29, pp.41-42, 東京大学生産技術研究所
- ② 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎, ワンボードマイコンを用いた建築構造物の性能モニタリングに関する基礎的研究—GR-SAKURAを用いた検討—, 日本建築学会 第 36 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), 査読無し, 2013.12.6, pp.257-260, 日本建築学会建築会館

- ③ 谷明勲, 佐々木宏仁, 山邊友一郎, センサネットワークを用いた地震情報収集システムに関する研究—OSHWを用いたデータ収集・通信に関する基礎的検討—, 日本建築学会 第 36 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), 査読無し, 2013.12.6, pp.253-256, 日本建築学会建築会館
- ④ 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎, ジャイロセンサを用いた建築構造性能モニタリングに関する研究—3 層供試体を用いた計測精度及び周期同定の検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 論文番号 11013, 査読無し, 2013.8.30, pp.25-28, 北海道大学
- ⑤ 梁琪, 平賀隆, 谷明勲, 山邊友一郎, ジャイロセンサを用いた鉄骨 H 形鋼フランジ破断検出に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 53 号・構造系, 査読無し, 2013.6.15, pp.201-204, 大阪工業技術専門学校
- ⑥ 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎, 小型加速度ロガーを用いた建築構造性能モニタリングに関する研究, 日本建築学会 第 35 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), 査読無し, 2012.12.13, pp.331-334, 日本建築学会建築会館
- ⑦ 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎, 小型加速度ロガーを用いた建築構造性能モニタリングに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 論文番号 11048, 査読無し, 2012.9.13, pp.103-104, 名古屋大学
- ⑧ 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎, ジャイロセンサを用いた建築構造性能モニタリングに関する研究—固有周期及び相対変位応答の算定—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 52 号・構造系, 査読無し, 2012.6.17, pp.105-108, 大阪工業技術専門学校

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~a2/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

谷 明勲 (TANI, Akinori)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50155199

(2)研究分担者

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