

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：50101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22500078

研究課題名(和文)多様な情報源に対応する通信環境適応型センサネットワークの研究

研究課題名(英文) Ambient Wireless Sensor Networks for Multiple Information Resources

研究代表者

藤原 孝洋 (FUJIWARA, TAKAHIRO)

函館工業高等専門学校・生産システム工学科・教授

研究者番号：80435388

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：センサネットワークの多様なデータ属性を持つ情報源から情報収集する通信環境適応型センサネットワークについて研究を行った。その情報源の1つとして、地震の加速度について周波数特性を解析した。その結果に基づき、構造物ヘルスマonitoringのためのデータ収集方式とネットワークアーキテクチャについて検討し、テストベッドを構築した。そのセンシングデータを効率的に伝送するため、通信環境を考慮した通信制御方式として、複数の周波数帯域の利用を考慮した通信方式を提案し、スループットの向上を示した。また、ネットワークの“無閉路構造”に関するグラフ理論的考察について、無線センサネットワークを有向グラフとしてモデル化した。

研究成果の概要(英文)：We studied wireless sensor networks with adaptive wireless communications to gather information from sensing resources including a variety of data attributes. As one of the sources of information, we analyzed frequency properties on the recorded acceleration in an earthquake. Based on the result, we examined a data collection method and a network architecture for structural health monitoring and built a test bed. As a communication control in consideration of communication environment, we proposed a communication control method by using plural frequency bands to transmit the sensing data effectively and showed improvement of the throughput. In addition, about consideration of the graph theory about "the no closing circuit structure" of the network, I modeled a wireless sensor network as a directed graph.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：センサネットワーク ネットワークアーキテクチャ 通信制御 環境適応型無線ネットワーク 地震加速度 グラフ理論

1. 研究開始当初の背景

アドホックネットワーク技術やセンサネットワーク技術は、自律分散ネットワーク構築技術として期待されている。特に、センサネットワークは、災害時の被害状況の情報収集や、自然環境のモニタリング、住宅のセキュリティなど、様々な利用が検討されている。さらに、これらの無線ネットワーク技術は、災害等の異常時に被害状況を迅速かつ正確に把握できる技術として期待されている。さらに、災害時の適切な救助対応を可能にし、安全で安心な生活を支える基盤技術となることが期待されている。

センサネットワークは、様々な応用システムの要求によって、リアルタイム性や緊急応答性、データの優先順位など特定の目的のための技術開発が主に行われてきた。しかし、地震加速度と気温のように、データ収集タイミングが異なる情報源や、センサデータと画像データのようにデータサイズが大幅に異なる情報源など、多様なデータ属性の情報源からデータを適切に収集するための通信制御は十分には検討されていない。

2. 研究の目的

多様なデータ属性を持つ情報源から情報収集する無線センサネットワーク構築のための知見を得ることを目的とする。そのためのセンサネットワークアーキテクチャ、および通信制御方式について検討し、災害時の被害把握のための構造物ヘルスマニタリング等に活用するデータ収集システムの構築を目指す。そのセンシングデータの伝送効率を改善するため、通信環境適応型センサネットワークの通信方式について知見を得る。また、ネットワークの“無閉路構造”に関するグラフ理論的考察とモデル化によって、多様な情報源に対応するセンサネットワークについて知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 地震加速度に関する解析

建物に設置された加速度センサで検知された地震加速度について周波数解析し、特性を調べる。そのため、カリフォルニア大学アーバイン (UCI) で観測された地震加速度信号を解析し、加速度データを収集するための通信制御方式について考察する。併せて、UCIで行っている水道パイプラインの加速度モニタリングの研究について調査し、センサネットワークによる加速度モニタリング技術について調べる。

(2) 多様な情報源に対応するセンサネットワークアーキテクチャ

加速度モニタリングのための無線センサネットワークのテストベッドを構築してス

ループットを調査し、多様な情報源に対応するネットワークアーキテクチャを検討する。

(3) 無線センサネットワークの省電力化

加速度データを収集するセンサネットワークにおいて、省電力化のための制御方式を検討し、テストベッドで有効性を調べる。

(4) 通信環境適応型通信制御方式

通信環境に応じて複数の通信周波数を使い分ける適応型通信制御方式を検討し、コンピュータシミュレーションによって有効性を評価する。

(5) センサネットワークのグラフ理論的考察

センサネットワークの“無閉路構造”に関するグラフ理論的考察について、ネットワークを有向グラフとしてモデル化し、辺彩色問題として扱う。

4. 研究成果

(1) 地震加速度に関する解析

建物に設置された加速度センサで地震加速度をモニタリングし、加速度データを解析することによって、構造物ヘルスマニタリングのための要件を検討する。そのため、カリフォルニア大学アーバイン (UCI) で観測された地震加速度信号を解析し、加速度データ特性を把握する。

加速度解析

加速度信号 $x(t)$ が周期 T の周期関数と仮定し、サンプリング間隔 t でサンプリングすると、デジタル信号 $\{x[n] \mid n = 0 \sim N-1\}$ を得る。ここで、 $t = T/N = 1/SR$ 、 SR はサンプリングレートである。離散時間信号 $x[n]$ に対する離散フーリエ変換 $X[k]$ は次のように表される。

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi kn / N) \quad (1)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \exp(j2\pi kn / N) \quad (2)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1$$

T 秒間のエネルギーは、離散信号強度で次のように表すことができる。

$$E_T = \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 \Delta t = \frac{T}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 \quad (3)$$

さらに、パーセバルの定理から、エネルギーをフーリエ変換によって次のように表す。

$$E_T = \frac{T}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 = \frac{1}{N \cdot SR} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 \quad (4)$$

この信号のエネルギースペクトル分布 ESD と、その累積分布関数 CDF を次式で表す。

$$ESD[k] = \frac{1}{N \cdot SR} |X[k]|^2 \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

$$CDF[m] = \sum_{k=0}^m ESD[k] \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (6)$$

測定条件

地震の加速度を計測する目的で 43 台のセンサが UCI の Calit2 ビル (4 階建て) に設置されている。12 台のセンサ (3 方向 4 箇所) は Calit2 周辺の地面に設置され、地面の地震加速度を計測する。残り 31 台は建物のフロアと天井に設置されている。地震が発生すると、センサで計測された加速度信号が有線でレコーダに伝送され、50 秒間記録される。ここで、センサのサンプリングレートは 200sps、センサの帯域幅は 50 Hz、レンジは $\pm 1 \text{ G}$ (980 cm/s^2) である。

加速度データ解析

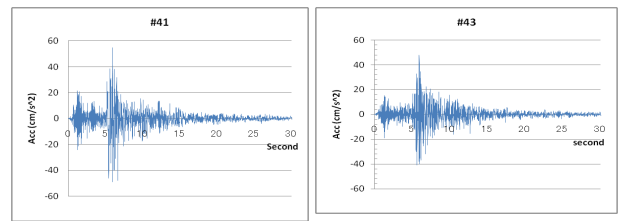
設置されたセンサのうち、地面の地震加速度を計測する No. 41, 43 の 2 台の信号波形を図 1(a), (b) に、この信号をフーリエ解析した結果を図 1(c), (d) に示す。これらのデータから、この地震のピーク加速度は約 50 cm/s^2 、震動期間は約 20 秒、帯域は 30Hz であることがわかる。

一方、建物加わる地震応答加速度に関して、建物に設置された加速度センサのうち、建物の水平面の縦方向では、1 階の No.2, 2 階の No.10, 3 階の No.19, 4 階の No.26 のそれぞれについてフーリエ解析し、その結果を図 2(a) ~ (d) に示す。各階の加速度の周波数応答から、上層階では建物の固有振動数で振動していることが確認された。この結果から、上層階では、数 Hz の信号を計測することになり、サンプリングレートを 10Hz 程度に下げることができる。

その他の加速度モニタリング

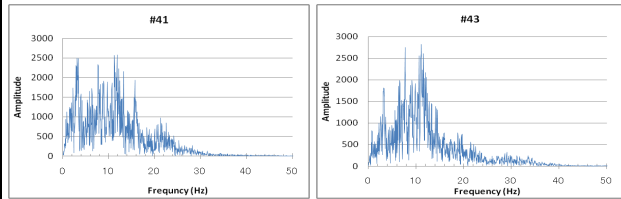
UCI の Professor Shinozuka のグループでは、水道パイプラインを伝搬する振動をセンサネットワークの加速度計で計測し収集する実験を行った^[1]。研究代表者が参加した実験の設備とその計測信号を図 3 に示す。ここで用いたセンサネットワークでは、サンプリングレートが 1ksps と高く、センサノードとシンクノードを有線の CAN プロトコルを利用する。

[1] M. Shinozuka et al, "Remote monitoring: concept and pilot study," IABMAS 2012, ISBN 978-0-415-62124-3, 2012.



(a) Sensor #41 (横方向)

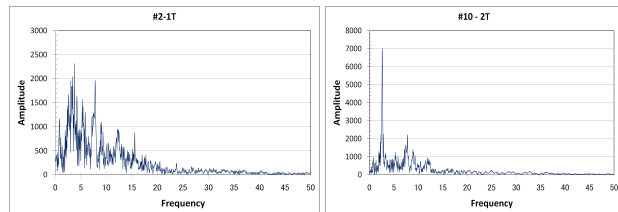
(b) Sensor #43 (縦方向)



(c) Sensor #41 周波数成分

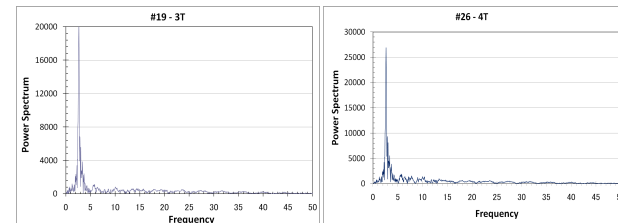
(d) Sensor #42 周波数成分

図 1 . 地面の地震加速度信号と周波数特性.



(a) Sensor #2 (1 階)

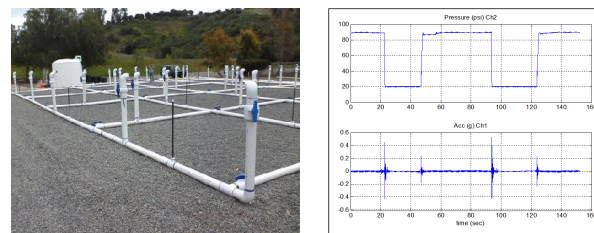
(b) Sensor #10 (2 階)



(c) Sensor #19 (3 階)

(d) Sensor #26 (4 階)

図 2 . 建物の地震応答加速度の周波数成分.



(a) モデル実験設備

(b) 水圧(上)と加速度(下)

図 3 . UCI 水道パイプライン実験.

(2) 多様な情報源に対応するセンサネットワークアーキテクチャ

3 階層地震モニタリングシステム

地震加速度のモニタリングでは、100Hz 以上の高速なサンプリングと、連続的なデータ伝送が求められる。また、多数のノードでモニタリングする場合、シンクノードまでのホップ数が増加し、シンクノード周辺でネットワークトラフィックの輻輳が生じる。

そこで、モニタリング領域を拡張するため、WDS (Wireless Distribution System)方式の無線 LAN を導入し、センサネットワークと WDS 無線 LAN ネットワークを併用したハイブリッドネットワークを検討した。そのモニタリングシステム概念図を図 4 に示す。第 1 層の無線センサネットワークと、第 2 層の WDS に加え、収集したデータをインターネット経由でデータベースに伝送する第 3 層のデータベースネットワーク層で構成される。

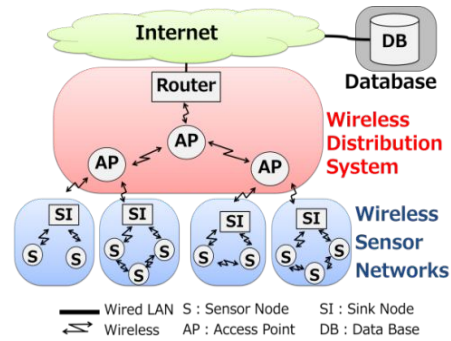


図 4. 3 階層地震モニタリングシステム。

テストベッド

地震加速度モニタリングシステムのテストベッドを構築するため、無線センサネットワークに Crossbow 社の IRIS MOTE を採用し、WDS 方式の無線 LAN には Buffalo 社のアクセスポイントを用いた。このアクセスポイントは、一般家庭用で使われるシリーズで、安価でかつ WDS の実験を行うための簡易な経路設定機能が附属している。データベースサーバは、サーバ OS として LinuxOS, Web サーバに Apache, データベースにリレーショナル型データベースの PostgreSQL を使用したこれらで構成されるテストベッドの構成図を図 5 に、その仕様を表 1 に示す。

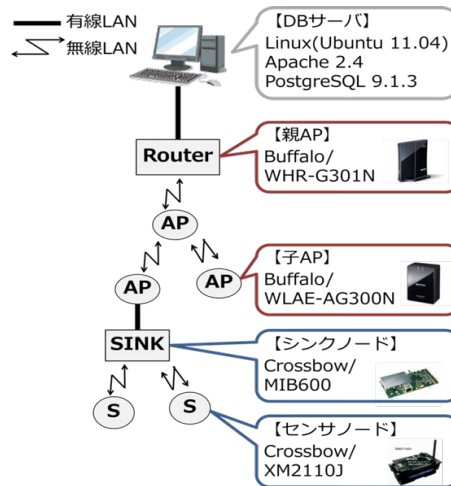


図 5. 3 階層地震モニタリングテストベッド。

性能評価実験

a) センサネットワーク：スループット

センサネットワークの伝送性能を評価するため、センサノードのサンプリングレートとノード数によってネットワークの負荷を変化させ、そのスループットを評価する。

実験条件：

- ・ サンプリングレート：50, 100, 125 (sps)
- ・ パケットサイズ：18 bytes
- ・ ノード数：1, 2, 3, 4 台
- ・ 伝送速度：250 kbps
- ・ 伝送方式：ブロードキャスト
- ・ ホップ数：1 hop

計測したスループットの結果を図 6 に示す。横軸はネットワークに入力される単位時間当たりのパケット数(Offered Load), 縦軸は単位時間あたりにシンクノードに到着したパケット数(スループット)を表す。この結果から、シンクノードに届くパケット数は約 200(packets/s), つまり 28.8 kbps であった。

b) WDS：スループット

無線 LAN のアクセスポイントを図 7 のようにカスケードに接続し、マルチホップ伝送実験によるスループットの結果を図 8 に示す。なお、無線 LAN のアクセスポイントには WLAE-AG300N (Buffalo) を使用し、IEEE 802.11g で動作させた。また、1 ホップの伝送距離は、屋内の見通し条件で約 30m とした。この結果から、nホップにおいて、スル

表 1. テストベッド機器仕様

サーバ	OS	Linux(Ubuntu11.0)
	Web サーバ	Apache 2.4
	データベース	PostgreSQL 9.1.4
無線 LAN IEEE802.11 n/g/b	親機	Buffalo: WHR-G301N
	子機	Buffalo: WLAE-AG300N
無線センサネットワーク IEEE802.15.4	センサノード	Crossbow: XM2110J
	シンクノード	Crossbow: MIB600

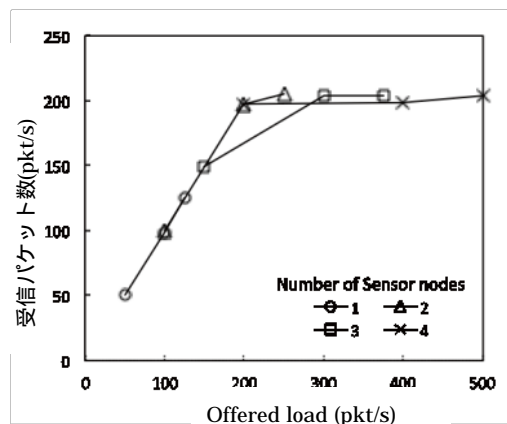


図 6. センサネットワークのスループット。

ーブットが $1/n$ に低下し、5 ホップでは約 5 Mbps になることが確認された。

(3) 加速度モニタリングセンサネットワークの省電力化

省電力化制御方式

地震による建造物の固有振動数に注目し、サンプリング周波数を制御することによって省電力化を図る方式を検討した。

前述の地震加速度の解析から、地震発生時、地表付近の地震波の帯域は 30~50Hz 程度であるので、その加速度の計測には 100 ~ 200Hz のサンプリングレートが必要である。一方、建造物上部では建造物が持つ固有振動数で振動するため、低周波数で振動し、信号帯域が狭くなる。このような建造物上部の加速度検出では、低いサンプリングレートで検出可能である。つまり、サンプリング周波数を地表付近では高く、建造物上部では低く設定することによって、データ収集頻度を減少させることができる。さらに、センサノードが加速度を検出しない期間をスリープさせる制御方式を用いると、サンプリングレートを下げてスリープできる待機時間を長くし、ノードのデューティ比を下げることによって省電力化を図ることができる。

実験結果

上記の制御方式の有効性を調べるため、3 台のセンサノードの加速度のサンプリングレートをそれぞれ 10Hz, 50Hz, 100Hz に設定し、各ノードからシンクノードへ測定データを送信する。送信するパケット長は 18 バイト、伝送レートは 250kbps である。それぞれのノードの電池の電圧をレコーダで記録し、ノードが停止する 1.7V に電圧が低下するまでの経過時間を比較する。サンプリングレートだけ下げ、受信機能とプロセッサ機能はそのままにした場合の電力消費の様子を図 9(a)に、センシングし送信する時間以外はスリープする制御を加えた場合の電力消費の様子を図 9(b)に示す。前者の場合、サンプリングレート 10Hz における稼働時間が約 167 時間で、100Hz の場合は約 150 時間であった。差は 17 時間と効果が限定的である。一方、スリープ制御を行った後者の場合、100Hz のサンプリングレートで、稼働時間は約 180 時間に、10Hz の場合では約 270 時間にそれぞれ延びた。従って、加速度のセンシングにもスリープ制御が有効に機能することが確かめられた。

(4) 通信環境適応型通信制御方式

無線マルチホップ通信の高送信レート化のため、複数の周波数帯を用いた無線通信方式を検討し、周波数帯によって特性や利用状

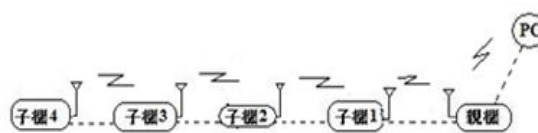


図 7. カスケード接続した WDS の構成

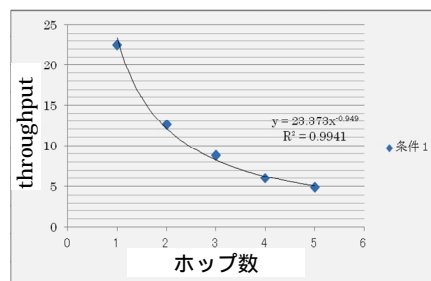
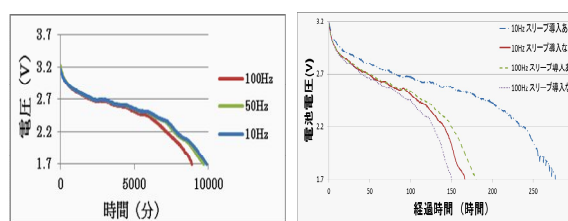


図 8. WDS 無線 LAN のスループット特性



(a) サンプリング比較 (b) スリープモード

図 9. センサノードの電池消費特性。

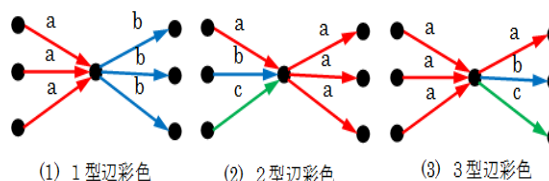


図 10. 無閉路構造を導くための辺彩色の分類。

況が異なることに着目して、周波数帯の利用状況を考慮する通信方式を提案した。この通信プロトコルは周波数帯を効率良く利用するため、遅延時間や混雑状況を考慮して使用する周波数帯域を選択する。まず、周波数帯ごとに宛先までの遅延時間を求め、遅延時間の小さい周波数帯を優先して通信する。提案方式を計算機シミュレータにより評価し、IEEE 802.11a 単独に比べて、スループットが最大約 1.6 倍、IEEE 802.11b 単独に比べて、スループットが最大約 4.7 倍向上することを示した。

(5) センサネットワークのグラフ理論的考察

ネットワークの“無閉路構造”に関するグラフ理論的考察について、無線センサネットワークを有向グラフとしてモデル化し、図 10 に示すように、送信・受信それぞれに対して有向グラフの辺彩色問題として扱った。有向グラフの基礎となる三つの辺彩色の型を導入することで、辺彩色という観点から無閉路

構造を導くことができ、有向グラフDが4型無閉路辺彩色を持つならばそのラインダイグラフL(D)もまた4型無閉路辺彩色可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

Takahiro Fujiwara, Takashi Watanabe, "Multi-tier Networks for Citywide Damage Monitoring in a Natural Disaster," InTech, Natural Disasters - Multifaceted Aspects in Management and Impact Assessment, 査読有, ISBN 980-953-307-942-9, pp. 31-51, August 2013.

Takahiro Fujiwara, Takashi Watanabe, Masanobu Shinozuka, "A scheme on multi-tier heterogeneous networks for citywide damage monitoring in an earthquake," Techno Press, Smart Structures and Systems, An Int'l Journal, 査読有, Vol. 11, No. 5, May 2013.

〔学会発表〕(計 12件)

Takahiro Fujiwara, Yugo Nakamura, Kousei Jinno, Taku Matsubara, Hideyuki Uehara, "A Model for Earthquake Acceleration Monitoring with Wireless Sensor Networks in a Structure," Proc. of SPIE2014, 査読有, Vol. 9061, pp. 90612V-1 - 6, March 2014.

中村優吾, 藤原孝洋, "異種センサネットワーク/アクチュエータの相互連携を実現するミドルウェアアーキテクチャの検討," 電子情報通信学会信学技報, 査読無, Vol. 114, No. 65, ASN2014-31, pp. 115-120, 2014年5月.

藤原孝洋, 神能孝誠, 中村優吾, 松原拓, 上原秀幸, "地震加速度分析と無線センサネットワーク通信制御に関する検討," 電子情報通信学会信学技報, 査読無, Vol. 113, No. 328, ASN2013-110, pp. 109-114, 2013年11月.

神能孝誠, 中村優吾, 松原拓, 藤原孝洋, 上原秀幸, "無線センサネットワークを適用した加速度データ収集システムに関する一検討," 電子情報通信学会信学技報, 査読無, Vol. 113, No. 132, ASN2013-74, pp. 147-152, 2013年7月.

神能孝誠, 中村優吾, 松原拓, 藤原孝洋, "無線センサネットワークを広域な地震加速度モニタリングシステムに適用するための伝送方式の検討," 情報処理学会第75回全国大会, 査読無, 2Y-8, pp. 3-435-436 (学生奨励賞), 2013年3月.

松原拓, 神能孝誠, 藤原孝洋, "無線センサネットワークを用いた地震加速度モニタリングの省電力化のための一考察 ~ サンプル周波数と消費電力の関係調査 ~," 情報処理学会第75回全国大会, 査読無, 1Y-8, pp. 3-415 - 416, 2013年3月.

中村優吾, 神能孝誠, 藤原孝洋, "無線センサネットワークによる地震加速度モニタリング用サーバの検討," 情報処理学会第75回全国大会, 査読無, 5W-5, pp. 3-269 -270, 2013年3月.

神能孝誠, ネンホアンマラー ティッパワン, 藤原孝洋, "無線センサネットワークによる地震加速度の広域モニタリングに関する検討," 電子情報通信学会信学技報, 査読無, Vol. 112, No. 30, AN2012-14, pp. 75-76, 2012年5月.

Takahiro Fujiwara, Maria Q. Feng, "Earthquake Acceleration Analysis in a Structure for Wireless Sensor Networks," 電子情報通信学会信学技報, 査読無, Vol. 111, No. 385, AN2011-69, pp. 83-88, 2012年.

T. Fujiwara, H.S. Ulusoy, M.Q. Feng, "Towards Low-Cost Structural Health Monitoring with Sensor Networks in Earthquake Damage Detection," Proc. of IWSHM2011, 査読有, pp. 2012-2019, Sept. 2011.

玉置健太, Ari Raptino H, 萬代雅希, 渡辺尚, "アドホックネットワークによる複数周波数帯を利用する通信方式について," 電子情報通信学会信学技報, 査読無, Vol. 111, No. 262, AN2011-51, pp. 177-182, 2011年.

河合博之, "ラインダイグラフの無閉路彩色とフィードバック頂点集合," 情報処理学会, 査読無, 研究報告アルゴリズム(AL), 2012-AL-141(3), 1-2, 2012年9月.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hakodate-ct.ac.jp/~tkfujivr/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原 孝洋 (FUJIWARA TAKAHIRO)

函館工業高等専門学校・生産システム工学科・教授

研究者番号： 80435388

(2) 研究分担者(1)

渡辺 尚 (WATANABE TAKASHI)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号： 90212050

河合 博之 (KAWAI HIROYUKI)

函館工業高等専門学校・生産システム工学科・准教授

研究者番号： 90435389