

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12605
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21700069
 研究課題名（和文） 環境センシング情報を通信制御に活用した環境適応的無線センサネットワークの構築
 研究課題名（英文） Field Information based Transmission Control in Environmental Wireless Sensor Networks

研究代表者
 大島 浩太（OHSHIMA KOHTA）
 東京農工大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号：60451986

研究成果の概要（和文）：本研究は、自然環境が無線通信効率に与える影響を考慮した、環境モニタリング用途で利用する無線センサネットワーク方式の要件調査と方式提案を目的としている。無線通信効率変動を計測するために開発した無線センサノードを実際の自然環境に配置・運用することで長期間の変動傾向を蓄積し、また環境モニタリングにおける要件調査を実施した。それぞれの成果を踏まえて、環境モニタリング用途の無線センサネットワーク方式として、耐障害性とデータ欠損防止および環境が通信効率に与える影響として任意時点で利用可能な通信帯域に着目し、蓄積データ量を考慮した通信制御方式の可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：One of the problems affecting sensor networks in natural environments is the attenuation of radio waves due to high moisture objects. This attenuation is greatest in the case of a 2.4-GHz radio wave. A system is being developed that uses a transmission control method to estimate communication environment fluctuations caused by changes in the natural environment. For developing the above control method, we have investigated a relationship between natural environmental changes and wireless transmission characteristics by developed sensor nodes in real environment. And, it was suggested that the transmission control method by using stored sensing data in each node is suitable by considering the field investigation results and a real requirement of environmental monitoring.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

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：無線センサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

J. M. Kahn 氏らによる膨大な超小型ノードが相互に無線通信して環境情報を収集する SmartDust (ACM MobiCom 1999) の提唱から端

を発した無線センサネットワークは、その応用性の高さから世界の国々が国家規模の重要技術と位置づけている。環境調査、農業応用、構造物管理、災害救援活動、ロボティク

ス、コンテキストウェアなど、無線センサネットワークはこれからの社会になくはない様々な用途への利用が期待されている。

無線センサネットワークは、ネットワーク技術を中心に SenSys, MobiCom, UbiComp, MobiSys, SIGCOMM などの国際学会や、国内の USN 研究会, UBI 研究会などで議論されてきた。バッテリー駆動という制約条件を理由に、電力消費の低減によるネットワーク稼働時間向上を目的とした通信制御方式(プロトコル, トポロジー)が多数提案され、シミュレーションにより有効性が示されてきた。しかし、応用アプリケーションをあまり想定せず技術開発が行われてきた歴史的背景から、実際に稼働している無線センサネットワークは少なく、またセンサネットワークの研究にも閉塞感が見られる。

最近の国内では、機器間協調により電波強度からセンサノードの位置推定を行う技術に代表される、位置に着目した研究が多く行われている。しかし、環境モニタリングは特定地点のデータに価値があるため事前の位置登録は許容でき、位置推定は必ずしも必要ではない。環境モニタリングでは、独自開発した省電力・小型センサモジュールを用いた新宿御苑における実証実験があるが、通信は IEEE 802.15.4 (Zigbee) 規格の標準的なトポロジーによる通信方式が採用されている。

国外の環境モニタリングも同様に、野鳥 (Mainwaring: WSNA 2002)、火山 (Allen: OSDI 2006)、氷河 (Martinez: SUTC 2006) モニタリングの研究はある。しかし、いずれも対象環境において通信できることが優先され、これまでに提案されてきた方式は採用されていない。

以上のように、これまで提案された数多くの通信方式はシミュレーション評価によるものが大半であることから、実環境適用時の有効性については懐疑的であるとの意見がある。屋内外に無線センサネットワークを敷設し通信状況を観測した J. Ahn らの研究 (ACM SIGCOMM Comp Comm Review 2008) では、同じ通信制御方式でも設置環境の違いで通信効率が大きく変動することが示され、設置環境依存の要因を考慮する重要性が示唆されている。

2. 研究の目的

本研究では、環境モニタリングへの応用を想定した無線センサネットワークシステムおよび通信制御方式の実現にあたり、自然環境が通信効率に与える影響に着目し、具体的に次の点を明らかにすることを目的とする。

- (1) 自然環境に設置した無線センサノードの無線通信効率がどのように変動している

かについて明らかにする。

- (2) 環境モニタリングにおける要件と無線通信効率の変動を考慮した無線センサネットワークの形態を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は、次の4つの段階に分けて実施する。まず、通信効率を計測するための自然環境に長期間設置可能な無線センサノードを開発し、それを用いて長期的な計測を行う。また、環境モニタリングへの利用を想定した、無線センサネットワーク方式について、計測実験結果およびスタンドアロンで動作するセンサ機器運用者からの調査を基に提案する。

- (1) 実環境における無線通信効率の実測調査システムの開発と運用

実際の環境に長期間設置するための無線通信効率変動計測用の無線センサノードを開発し、長期的な計測実験を実施する。

- (2) 実測結果の解析と傾向把握

計測実験で得られた結果を解析し、時期別、距離別、特異な状態における通信効率の変動傾向を把握する。

- (3) 環境モニタリング向け無線センサネットワークの要件調査

実際に農学研究用途で、無線通信機能を持たないセンサ機器を自然環境に設置・運用している研究者との対話を通じて、環境モニタリングにおける要件を明らかにする。

- (4) 調査結果を踏まえた環境モニタリングに適した無線センサネットワーク方式の検討と提案

通信効率変動実験および要件調査から得られた事柄を基に、農学研究で利用可能な環境モニタリング用途の無線センサネットワークとして、どのような点が課題となり、またどのような制御が可能かについて明らかにする。

4. 研究成果

- (1) 実環境における無線通信効率の実測調査システムの開発と運用

実環境における環境変化が 2.4GHz 帯の無線通信にどのように影響するかを把握するため、東京農工大学の演習林・FM 多摩丘陵に実際に機器を設置し、計測実験を実施した。実施にあたり、小型ノートパソコンとセンサデバイスからなる計測用無線センサノードを開発 (図 1) し、それを耐環境ボックス (WB-13AJ) に格納したものをを用いた無線センサノードを構築した。長期間の無線通信効率の変動を記録するため、バッテリーでは無く既設の電源設備から電力を供給するようにした。

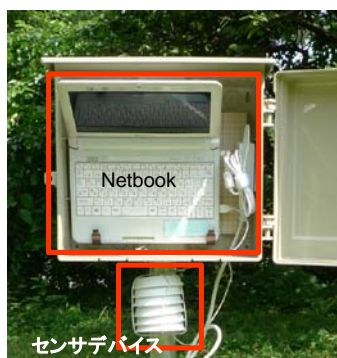


図1 開発センサノード

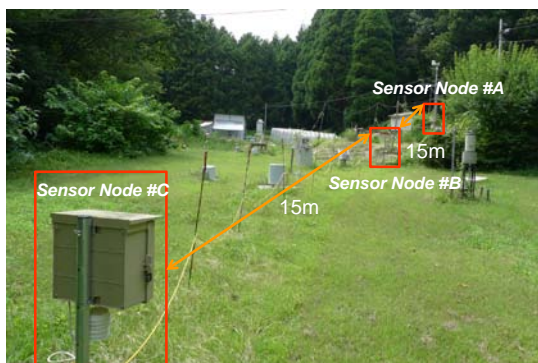


図2 センサノードの設置状況

開発した無線センサノードの仕様は表1のとおりである。ノード間は802.11b/gを用いたアドホック通信を採用し、Linux OSを用いて、無線信号強度、通信帯域を定期的に記録するソフトウェアを開発・動作させている。前者の計測には iwconfig を、後者の計測には IPerf を利用した。センサデバイスには SparkFun Electronics 社・USBWeather v2 を利用し、温度・湿度・気圧を計測した。

表1 無線センサノードの仕様

項目	仕様
モデル	IdeaPad S10-2
OS	Ubuntu 9.04
Wi-Fi	802.11b/g (ad-hoc)
Wireless Controller	Broadcom BCM4315

開発した無線センサノードの設置状況を図2に示す。見通しの良い場所に15m間隔で設置した。また、周囲には2.4GHz帯無線電波の干渉源は存在しない。この環境を用いて、2010年5月、2011年5月から現在(2012年5月)まで無線通信効率の変動調査を実施した。

(2) 実測結果の解析と傾向把握

図3に、2010年5月に実施した無線通信効率計測実験の結果(通信帯域)を示す。図2における Sensor Node #A と#B の2台を利用して計測した結果である。

結果、この期間は無線通信効率の変動幅が大きく、最小3.91Mbps、最大17Mbps、平均11.63Mbps という結果が得られた。2.4GHz帯

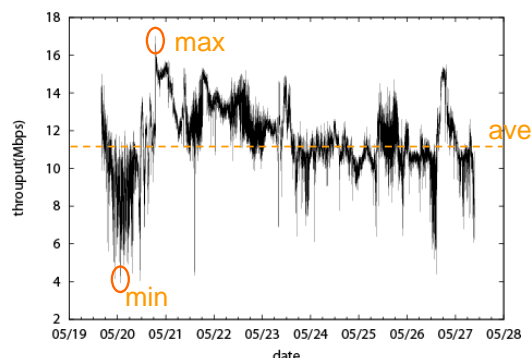


図3 無線通信効率変動(2010年5月)

を利用する他の電波干渉源が無いことから、この変動は設置環境の変化に起因していると考えられる。そこで、期間中に計測した湿度変化との相関を求めた所、負の相関 -0.299 が得られた。2.4GHz帯無線周波数帯は、水分により吸収・減衰されることが広く知られている周波数帯であるが、その波長から空気中の水蒸気による吸収・減衰はほとんど無い周波数帯でもある。そのため、雨に起因する土壌や樹木・草の水分量の増加、耐環境ボックス表面の水滴などによる吸収・減衰が生じた可能性が示唆される。

次に、図4,5に、前述の環境を用いて、2011年5月末から2012年3月末まで期間実施した帯域測定の結果を示す。図4(a)は計測ノードB-C間(15m間隔)の期間全体、図4(b)はA-C間(30m間隔)の期間全体、図5(c)はB-C間のある1日、図5(d)はA-C間のある1日の通信帯域変動の様子を示している。グラフの黒い線は期間中に計測した帯域を全てプロットしたものを、中央付近にある薄い線は通信帯域の1時間当たりの平均値を示している。計測ノードA-B間(15m)は最大・最少・平均値は異なるものの、B-C間と変動傾向は類似していたため省略した。また、計測期間中は、梅雨、夏、秋、冬、春へと季節が変化し、9月と11月に強い暴風雨が、1月と3月には積雪が発生している。

まず、図4(a)に示した平均値の変動傾向から、通信効率変動の不安定期間(5~7月)と安定期間(7月~)が確認できる。不安定期間については、2010年度に実施した計測実験と酷似する結果が得られており、時期とそれに付随する環境変化が通信効率に影響を与えているものと考えられる。9月半ばの通信効率低下は、台風によりノードAおよびBが転倒し、水分を含む地面との計測ノードの距離が近づいたことから、2.4GHz帯無線電波の水分子吸収により大きく減衰したのと考えられる。不安定期間については、通信帯域変動と湿度変化の相関は -2.9 程度になり、湿度が増加すると通信帯域が減少している。それ以外の期間については、帯域と湿度に顕著な相関は見られなかった。11月上旬の通信効率の向

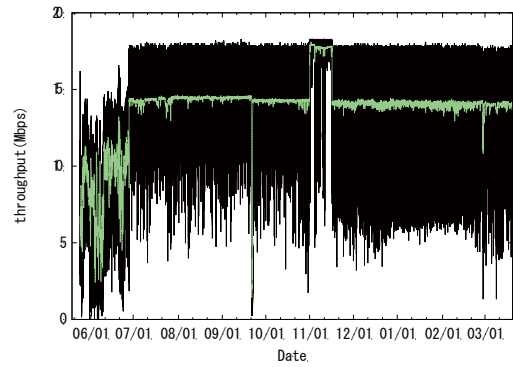
上は、暴風により計測ノードAが転倒・故障し、ノードB-C以外に電波を発する機器が無くなったことが原因と考えられる。また、図4(b)におけるこの期間は、計測ノードAが存在しないため、通信帯域はゼロになっている。

次に、図4(b)から、ノード間の距離が延びることで、通信効率の変動が全体的に不安定になっていることが見て取れる。B-C間の不安定期間とA-C間の同期間の変動傾向は類似しているため、特定時期の環境要因により通信効率が不安定になっていると考えられる。要因については調査中であるが、太陽放射が通信効率に影響を与えるとの関連研究もある。通信帯域の最大・最小値については、無線電波は基本的に距離の累乗に比例して減衰するため、B-C間の最大・最小値よりも悪いケースが多い。しかし、平均値については、省略した計測ノードA-B間の平均値より高い結果を示している期間も存在していた。

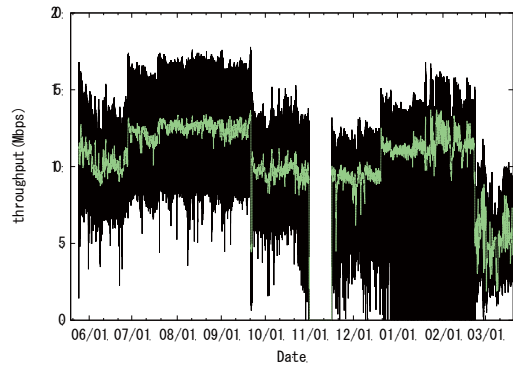
最後に、図5(c)および(d)から、長期的には無線通信効率は大きく変動するが、短期的には1時間当たりの平均値はほとんど変動していないことが見て取れる。図5(c)および(d)は同一期間の結果ではないが、期間全体を通して1日あたりの変動傾向は図5(c)および(d)と類似の傾向を示している。最大・最小値の変動幅は、距離が短い計測ノード間は比較的大きく、距離が長いノード間の変動幅は小さいという、興味深い結果が得られた。この原因としては、計測ノードの姿勢やアンテナによる電波伝搬特性が原因の1つとして考えられる。環境要因が影響している可能性もあるため、原因を解明するための詳細な調査・検証を予定している。

(3) 環境モニタリング向け無線センサネットワークの要件調査

農学分野において、日照、雨量、気温、湿度、水質といったデータは植物の成長や動物の生態などを解析する際に重要なデータである。農工大の農学部では、実際にセンサ機器を使ってこれらのデータ計測を行っている。センサ機器は、計測データを機器内に保存するため、定期的に人が回収する必要がある。したがって、遠隔地にセンサ機器を設置している場合は回収のために出向く必要がある、リアルタイムに遠隔地から計測結果を利用することはできない。また、機器障害は、人がデータ回収を行って初めて発見できるという問題がある。そのため、研究データの計測という点からは、人力によるきめ細やかな監視と障害対応が必要になるのが現状である。

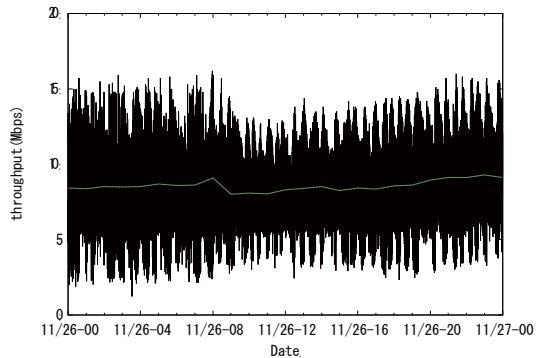


(a) Node B ~ C (15m)

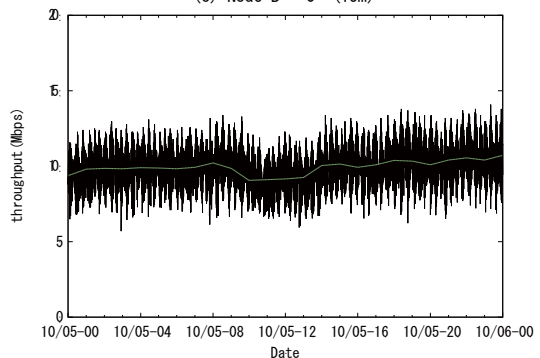


(b) Node A ~ C (30m)

図4 距離別・長期的通信効率変動



(c) Node B ~ C (15m)



(d) Node A ~ C (30m)

図5 通信効率変動(1日の傾向)

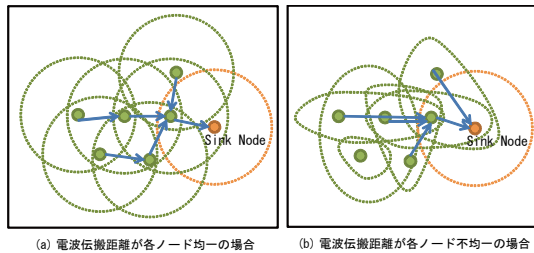


図 6 電波伝搬の不均一性によるトポロジーへの影響例

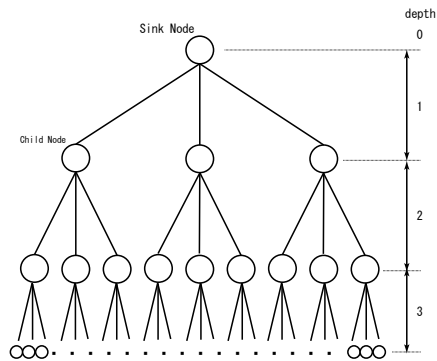


図 7 ツリー上に展開した無線センサネットワークトポロジー例

次に、センサ機器の設置場所に関する要件は次のとおりである。

- ・特定のオブジェクト(樹木など)近辺の計測
 - ・気象など地域を代表できるデータの計測
- 双方に共通するのは、場所を選ばないセンサ機器の設置である。小型機器を使うことで、設置場所の自由度は高まる。しかし、屋外への設置では、電源や通信手段の確保が重要となる。電池や太陽電池パネルによる電源は、連続稼働時間や確保できる日照量に問題があり、電源問題の解決に十分ではない。特に森林では太陽電池の利用は難しい。また、通信手段として無線を利用する場合は、送信電力と受信電力および通信量で電力が消費される。特に、送信電力は距離に応じて増加する。したがって、機器の設置箇所やセンシングタイミングに制約が生じる。

これらの状況から、研究利用での無線センサネットワークに求められる機能要件として、次の事項を設定できると考えられる。

- (a) データを可能な限り欠落無く収集し、欠落を把握
- (b) ノード障害を早期に検知し管理者に通知
- (c) 無線通信に関する専門知識が無い管理者が設置

- (4) 調査結果を踏まえた環境モニタリングに適した無線センサネットワーク方式の開発
- 実験結果から、十分な通信容量を利用できるノードとの通信可能距離は状況によって

様々に変化すると考えられる。図 6 に示すのはその概要で、図 6(a) は各ノードの電波伝搬範囲が均一の場合を、図 6(b) は環境条件により電波伝搬範囲が不均一になる場合を示している。実線の丸はノードを示しており、破線は各ノードの電波伝搬範囲を示している。実線矢印は、各ノードが計測したデータをシンクノードに伝達する際の経路を示している。前章で述べた実験結果から分かる通り、電波伝搬範囲は各ノードで均一ではなく、また利用できる通信容量も常に変化する。そのため、図 6(b) に示すような複雑な状況を想定する必要があり、また状況は環境の変化に伴い適宜変化する。

図 6(b) では、電波の減衰により電波伝搬範囲が狭く他のノードが通信可能圏内に無いノードも記載している。このような場合は、内部ストレージに計測データを蓄積しておき、通信環境が良好になり他のノードと通信可能になった際に計測データを送信するなどの制御が必要となる。しかしこの場合、受信側はバースト的に大きなデータを受信・転送する必要があり、結果としてネットワーク全体のシンクノードまでのデータ伝送効率を低下させる恐れがある。そのため、蓄積データ量を考慮した伝送データ量の制御や、管理者への通知とネットワーク機能の改善が必要になる。ネットワーク機能の改善には、中継ノードの設置などがある。シンクノードに未到達の蓄積データ量を管理者に通知し、管理者が手動で回収に行くといった運用面での対応も有効であると考えられる。

次に、図 6(b) には、アンテナの角度や形状、送信電力を要因とする、片方からの通信は電波伝搬範囲に入っているため届くが、逆方向の通信は電波伝搬範囲外にあるため届かない状況のノードペアを記載している。本研究で想定している応用ではデータの欠落は好ましく無いため、TCP のような 3-way handshake を利用してデータ伝送の信頼性を向上するなどの方式が必要となる。しかし、通信するノードの片方しか電波伝搬範囲に入っていない場合はこのような手法を用いた信頼性確保は難しい。そのため、まず、通信するノードがそれぞれお互いの電波伝搬範囲に入っている場合のみデータ伝送を実施する方式が考えられる。この場合は、3-way handshake による到着確認と、ストレージからのデータ消去が容易に可能となる。他には、片方のみ伝搬範囲に入っている場合でもデータを送信し、逆方向の通信が可能な時に受診確認を行うという DTN のような通信制御方式が考えられる。この場合は、電波伝搬範囲を最大限に活かした通信が行えるという長所を備えるが、データ到着の信頼性を確保するためには、到着確認を受信するまでデータをストレージに保持しておく必要がある。この方式は、送信側ノードが電波伝搬範囲を把

握ることができれば十分に利用できると思われる。そのためには、無線センサネットワークの運用中に電波伝搬範囲を調査するための通信が必要となる。

次に、空間に無線センサノードを一様にばらまいた状態を想定し、それをシンクノードを頂点とするツリー構造に展開した際のネットワークモデルを図7に示す。平均子ノード数(AL)、ノードが単位時間あたりに生成するデータ量、任意のルートノードを頂点とした部分木から末端までの木の深さ(depth)、データ送信時刻から、任意のルートノード*i*について、ノード*i*より下位の各ノードから収集し、自身の生成データを含めて上位に転送するデータ量の合計をモデル化したものを次式に示す。headerはパケットに付与するヘッダサイズ、rateはノードが単位時間あたりに生成する計測データ量、 t_n はデータを送信する時刻を意味している。

$$D_i(\text{rate}, \text{depth}, t_n) =$$

$$(\text{header} + \text{rate} \times (t_n - t_{n-1})) \times \sum_{j=0}^{\text{depth}} AL^j$$

このモデルでは、簡単化のため中継するだけのノードの存在は考えず、またデータの圧縮や時間的・空間的局所性を利用したデータの間引きも考慮していない。

式から得られた値が利用可能な通信容量より大きくなる場合は、蓄積された計測データ全てを上位ノードに送信することができないため、ノード自身に蓄積することになる。この状態が続くと、ノードの残ストレージ容量が減少し、最終的に新規に計測したデータを保持することができなくなる。また、ノードのアクティブ・スリープ状態を切り替えることで省電力化を図る場合、DutyCycleの割合によって利用可能な通信容量は減少する。したがって、転送すべき計測データの総量と利用可能な通信容量は、シンクノードへの確実なデータ伝送という観点から重要な課題である。

また、通信効率計測実験で示したように、利用可能な通信容量は時間により変動する。任意時点 t_n で利用可能な通信容量を $LC(t_n)$ とした場合、計測データがノードに蓄積されるか否かおよび蓄積されるデータ量は次式のように表せる。

$$Store(t_n, i) = D_i(\text{rate}, \text{depth}, t_n) - LC(t_n, i)$$

$Store(t_n, i) > 0$ の場合は通信容量不足でノードに計測データが蓄積され、 $Store(t_n, i) \leq 0$ の場合は全てのデータを上位ノードに転送できることを意味する。

ノードの故障を考えない場合、任意時点 t_n までに任意ノード i に蓄積されるデータの総量は次式のようなになる。したがって、通信効率とノードの残存データ量を管理しておき、運用側にフィードバックをかけることでデ

ータの欠損防止や無線センサネットワークのボトルネック検知の可能性が示唆される。

$$Store_{total}(t_n, i) = \sum_{j=1}^n Store(t_j, i)$$

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 大島浩太、原宏、萩原洋一、寺田松昭、**FM** 多摩丘陵における設置環境と無線通信品質の相関調査、フィールドサイエンス (Journal of Field Science) 10:9-15、査読有、2012
- ② 大島浩太、大塚英悟、田島孝治、高田治、寺田松昭、“無線センサネットワークにおける自律分散型ストレージ方式”、情報処理学会論文誌、査読有、Vol.51、No.3、pp.835-845、2010.

[学会発表] (計5件)

- ① Kohta Ohshima、Hiroshi Hara、Yoichi Hagiwara、Matsuaki Terada、“Field Investigation of the Radio Transmission Performance and Distance in a Environmental Wireless Sensor Network”、International Conference on Information Networking (ICOIN) 2012、査読有、pp.132--137、2012.2.2、Bali, Indonesia
- ② 大島浩太、原宏、寺田松昭、“無線センサネットワークにおける自然環境への適応を特徴とする通信モデルの提案”、第2回情報ネットワーク科学研究会、2012.1.20、関西学院大学大阪梅田キャンパス
- ③ Kohta Ohshima、Hiroshi Hara、Yoichi Hagiwara、Matsuaki Terada “Field Experiments for Developing Transmission Control Based on Weather Estimation in an Environmental Wireless Sensor Network”、2010 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC2010)、査読有、pp.25-30、2010.11.1、Auckland, New Zealand

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大島 浩太 (OHSHIMA KOHTA)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60451986

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし