

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 3 月 26 日現在

機関番号：13904
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560397
 研究課題名（和文）
 高度農産物生産管理のための低消費電力無線センサネットワークの開発
 研究課題名（英文）
 Energy-Efficient Communication Technologies in Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture
 研究代表者
 上原 秀幸（UEHARA HIDEYUKI）
 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00293754

研究成果の概要（和文）：

本研究では、農産物の育成管理を自動化するために必須となる無線センサネットワークの低消費電力な通信プロトコルの要素技術を開発した。開発した技術は、複数の物理量（土壌水分、温度、湿度等）の相関特性に着目して制御する点に大きな特徴である。この技術は、情報理論的観点から導出した集約モデルに基づいている。要素技術として、クラスタ内の間欠送信スケジューリング法、予測センシングによる省電力化技術、およびトラヒック適応スリープ制御法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Energy-efficient communication technologies in wireless sensor networks have been developed, which aim at application to a smart agriculture. The feature of our schemes is based on the correlation characteristics of observed data such as soil moisture, temperature and humidity. The developed energy-saving technologies are as follows; an intermittent transmission scheduling in intra-cluster, a prediction sensing and an adaptive sleep control.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：無線センサネットワーク、低消費電力、MAC プロトコル、ルーティング、クラスタリング、相関性、農業

1. 研究開始当初の背景

(1) センサネットワークとは？

無線通信機能をもち一つもしくは複数のセンサデバイスを搭載した小型のセンサノードによって自律的に構成されるネットワークである。その応用範囲は、環境モニタリ

ング、防災、防犯／監視、交通、食／農業、医療／福祉、構造物管理、物流などあらゆる分野におよぶ。給電配線および通信配線を不要とすることで、設置の自由度と拡張性に優れている反面、消費電力全体に占める無線の送受信による消費電力の割合は非常に大き

く、低消費電力な無線通信技術が要求されている。一つのノードのバッテリー切れは、ネットワーク全体の寿命（ネットワークライフタイム）を短くするため深刻な大問題である。

(2) 関連研究

LEACH を始めとする低消費電力な無線通信プロトコルが検討されてきた。これらは、観測値が空間的・時間的に一様に連続的に分布しているとの仮定のもと、長距離通信を削減したり、ノードを順にスリープさせたり、データ集約を行うことで電力消費の削減を図ったものである。

(3) 解決すべき課題

実際の環境では、上記の仮定が常に成り立つわけではない。我々は室内外での簡単な温度測定実験結果から、結合エントロピーを指標とした測定値の相関特性を解析し、その空間的な非一様性・不連続性を実証した。また、東三河農業試験場の圃場をお借りし、キャベツ畑の土壌水分を定植から収穫後までの半年間測定した。その結果、土質や定植時期の違いによって、収集した土壌水分データの相関特性にも違いが見られることを確認した。

(4) アプローチ

以上二つの実験結果から、単に物理的な位置関係のみを指標とした消費電力削減手法は適切とはいえず、観測データのもつ相関性を積極的に活用することで、より効率的なデータ集約が可能となり、一層の低消費電力化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、農産物の育成管理を自動化するための無線センサネットワークの低消費電力な通信プロトコルを開発する。開発するプロトコルは、複数の物理量（土壌水分、温度、湿度等）の相関特性に着目して制御する点に特徴がある。要素技術として、クラスタリングアルゴリズムのため間欠送信スケジューリング法や予測センシングによる省電力化技術、低遅延化のための適応スリープ制御技術も開発する。

3. 研究の方法

(1) 集約モデルの導出

以下の実環境データから観測データ間の相関特性を解析し、結合エントロピーから集約モデルを導出する。

- ・ 研究室内にセンサネットワークを構築して測定した温度と照度
- ・ 東三河農業試験場のキャベツ畑で測定した土壌含水率
- ・ 気象庁が提供している温度、湿度、風速
- ・ SensorScope が提供している温度、湿度、風速、日射量

(2) 間欠送信スケジューリング法の開発

集約モデルに基づき、観測データを送信するクラスタ内のノード数を決定し、その送信スケジュールアルゴリズムを開発する。

(3) 省電力トポロジの探索

集約モデルに基づき、低消費電力なネットワークトポロジを理論的に探索する。

(4) 予測センシングによる省電力効果

各種予測アルゴリズムの送信回数削減効果を比較検討し、通信路誤りによる性能を評価する。

(5) 適応スリープ制御

スリープ動作をする MAC プロトコルにおいて、低遅延化を実現するためにトラフィック量に応じてスリープ期間を決定するアルゴリズムを開発する。

4. 研究成果

(1) 集約モデル

Huffman 符号等の情報源符号化では、確率的なデータ圧縮により冗長な情報を削減している。ここでは、観測したデータのもつ相関性に着目し、冗長なデータ量を削減するための集約モデルの導出を試みた。

① 情報源符号化後のデータサイズの定式化

確率変数を V_1, \dots, V_n 、それぞれの確率変数が取る値を v_1, \dots, v_n とし、 v_1, \dots, v_n が取りうる値の集合をそれぞれ V_1, \dots, V_n とする。このとき V_1, \dots, V_n の結合エントロピー $H(V_1, \dots, V_n)$ は次式で与えられる。

$$\mathcal{H}(V_1, \dots, V_n) = - \sum_{v_1 \in V_1, \dots, v_n \in V_n} p(v_1, \dots, v_n) \log_2 p(v_1, \dots, v_n)$$

ここで $p(v_1, \dots, v_n)$ は確率変数 V_1, \dots, V_n の結合確率密度関数である。また、確率変数の個数が $i-1$ 個から i 個に増えたときのエントロピーの増加量 $\Delta H(i)$ を次式で定義する。

$$\Delta H(i) = \begin{cases} 1, & i=1 \\ \frac{\mathcal{H}(V_1, \dots, V_i) - \mathcal{H}(V_1, \dots, V_{i-1})}{\mathcal{H}(V_1, \dots, V_{i-1})}, & i>1 \end{cases}$$

ここで、 V_x はセンサノード x の観測対象、 v_x が観測値を表す。 $H(V_1, \dots, V_n)$ は冗長無くセンサノード $1, \dots, n$ の全ての観測値を表現するために必要なビット数を表している。ノード数 m のときの結合エントロピー $H(V_1, \dots, V_m)$ を $H_{agg}(m)$ として表すと次式となる。

$$H_{agg}(m) = H_1 + H_1 \sum_{i=2}^m \Delta H(i) = \mathcal{H}(V_1, \dots, V_m)$$

ここで、 H_1 は各ノードで得られる観測値のエントロピーの平均値である。

② エントロピー増加量のモデル化

実際の観測値を基にエントロピー増加量の導出を行った。エントロピー導出に際して、図1のように屋内にセンサネットワークを構

成して温度、および照度データを収集した。

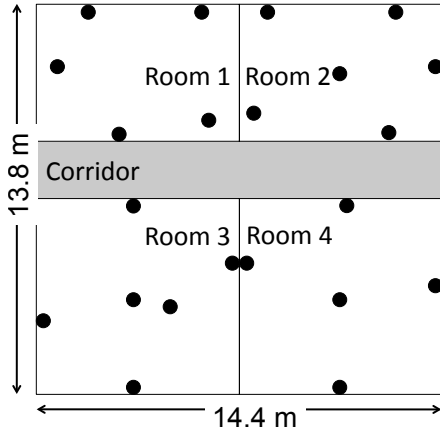


図1: 屋内センサネットワークのノード配置

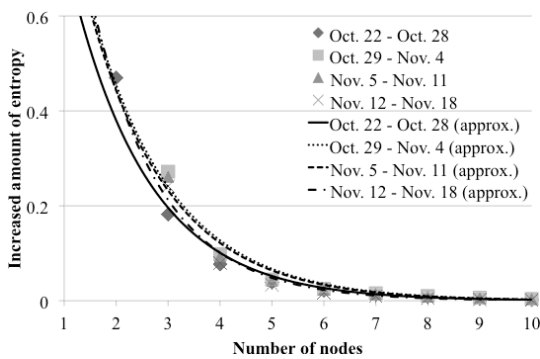


図2: 気温データのエントロピー増加量

図2に気温データのエントロピー増加量を示す。データの取得期間によって値は異なるものの、センサノード数の増加に伴い0に漸近することが分かる。このエントロピー増加量を以下の指数関数で近似する。

$$\Delta H(i) = a \cdot \exp(-b \cdot i), \quad (i > 1)$$

ここで、 a および b は観測条件や観測対象等に依存する定数である。特異な場合として $a=0$ のときエントロピーの増加量が常にゼロとなることから、結合エントロピーはノード数によらず H_1 で一定となる。また $b=0$ のときセンサノード数によらずエントロピー増加量は一定となり、結合エントロピーも傾き a の直線となる。この式を集約モデルとして定義した。

(2) 間欠送信スケジューリング法

導出した集約モデルを利用して、クラスタ内のデータ送信回数を削減する間欠送信スケジューリング法を開発した。シンクノードが計算した集約モデルの係数とエントロピー増加の有無を判断するしきい値 H_{TH} から、各センサノードのデータ送信確率 p_k を計算する。センサノードはこのデータ送信確率を基に間欠送信を行い、クラスタヘッドでは情報源符号化を行わずにデータを送信する。

① 間欠送信スケジューリング法のアルゴリ

ズム

- (a) シンクノードは、これまで受信したデータからクラスタ k の集約モデル $\Delta H_k(m_k)$ を導出する。
- (b) シンクノードは各クラスタに対して、以下の条件を満たす最小のノード数 m_k を求める。

$$\Delta H_k(m_k) \leq H_{TH} \quad (1 \leq m_k \leq M_k)$$

ここで M_k はクラスタ k 内のノード数である。

- (c) 各クラスタ内のセンサノードの送信確率 p_k を求める。

$$p_k = \frac{m_k}{M_k}$$

- (d) 計算した送信確率 p_k をクラスタ k のノードに通知する。クラスタ内のクラスタメンバは p_k に従いデータ送信フェーズにおいて確率的にデータ送信を行う。したがって m_k はデータ送信フェーズにおける1フレームあたりの送信ノード数の期待値を表す。

② 送信回数削減効果

図3に間欠送信スケジューリングを用いない場合に対する、用いた場合の送信回数削減率を示す。クラスタリング法として、距離指標の LEACH と相関性指標の CLARA を用いた。しきい値が大きいほど送信回数削減率が増加していることが分かる。しきい値が0.2のとき、LEACHで73%、CLARAで67%の送信回数の削減を実現している。

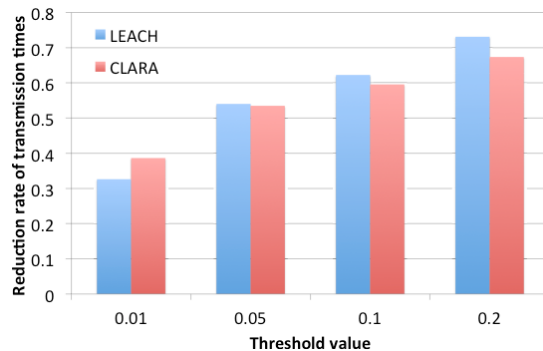


図3: 送信回数削減率

(3) 省電力トポロジの探索

ネットワークトポロジに着目し、集約を想定した際の各トポロジの消費電力について定式化を行うとともに、シミュレーションによって様々な条件における消費電力について比較を行った。更にトポロジ毎に消費電力が低くなる条件を明らかにし、省電力化を実現するためのトポロジを構成するルーチングプロトコルの設計指針について示した。

① 想定トポロジ

表1に想定したトポロジとその特徴をまと

める。これらのトポロジについて、集約効果などの条件を変化させたときのネットワーク全体の消費電力を導出した。なお、MAC層でのパケット衝突やオーバーヒアリングによる消費電力は考慮せず、各ノードは送信電力を自由に変更可能であると仮定した。

表 1: 想定するネットワークトポロジ

トポロジ	特徴
Direct	<ul style="list-style-type: none"> 1ホップ通信 通信距離は最も長い
Tree (Flat)	<ul style="list-style-type: none"> 全ノードで最短経路木
Chain	<ul style="list-style-type: none"> 全ノードをホップ 通信距離は最も短い
Cluster	<ul style="list-style-type: none"> CH経由の2ホップ通信
Multi-hop cluster	<ul style="list-style-type: none"> CH間で最短経路木 クラスタ型より通信距離が短い

② 消費電力の比較

図 4 に横軸をノード数、縦軸をセンシングエリア一辺の長さとし、最も消費電力が低いトポロジを色分けした結果を示す。エリア一辺の長さが 80m 以下では直接通信（紫）が最も消費電力が低いことがわかる。直接通信では他のトポロジと異なり他ノードからのデータ受信による電力消費がなく、また直接通信のデメリットである平均通信距離の長さもエリアサイズが小さい場合は影響が少ないためである。エリア一辺の長さが 100m 以上ではマルチホップクラスタ型（赤）、260m 以上ではチェーン型（緑）の消費電力が低い。エリアサイズが大きくなるほど平均通信距離の影響が大きくなる。チェーン型、マルチホップクラスタ型、ツリー型は、ホップ数を重ねることで平均通信距離を削減している。

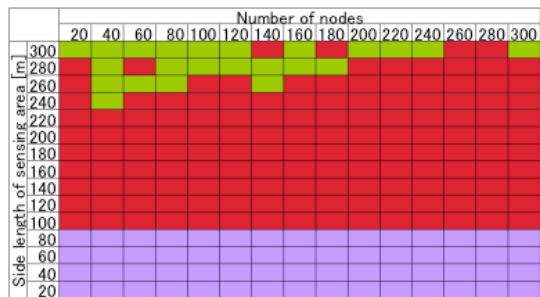


図 4: 消費電力が最も低いトポロジを示したカラーマップ（実環境のデータ集約）

(4) 予測センシングによる省電力化

送信回数を削減する手段として、予測センシングに着目した。予測センシングでは、センサノードとシンクノードで測定値の予測を行い、予測に失敗したときのみセンサノードとシンクノードで通信を行うことで通信回数を削減できる。

① 予測アルゴリズム

ハードウェア的制限の厳しいセンサノードに実装が可能な、

- ・ 移動平均
- ・ 予測メモリ
- ・ 最小二乗法
- ・ カルマンフィルタ
- ・ LMS 適応フィルタ

について検討した。これらの予測時の消費電力に大きな差は出なかった。一方、送信回数削減率は、カルマンフィルタ、予測メモリを用いた場合で高くなり、測定環境によっては最大で 95% を越えた。適応フィルタは、トレーニング期間の影響を受けて低くなった。

② パケット損失の影響

シンクノードが予測失敗を知る唯一の方法は、センサノードから送信される訂正情報（パケット）の受信のみであるため、通信時にパケットの損失が発生すると、シンクノードは予測に成功したと誤って判断してしまう。そこで、パケット損失が発生した場合のセンサノードでの測定値と、シンクノードでの予測値の差（予測誤差）を評価した。図 5 に実験で用いたシステム構成を示す。ノード数は 10 台である。

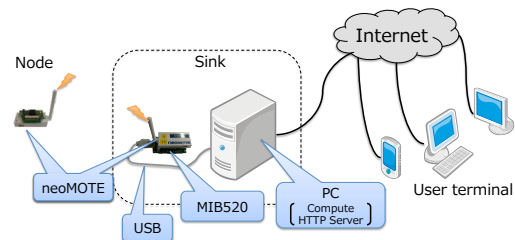


図 5: 学内センサネットワーク構成概略図

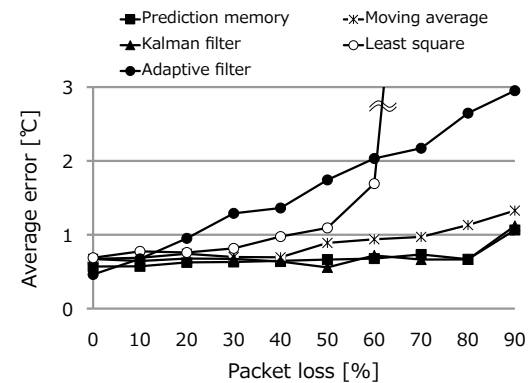


図 6: 屋内温度の予測誤差（許容誤差 2.0°C）

図6に示すように、室温を許容誤差 2°C で予測センシングする場合、カルマンフィルタ等の予測機構を用いることで、パケット損失が90%発生する環境下でも予測誤差が許容誤差以下となった。しかし、測定値の変化が激しいハウス内温度や、許容誤差が小さい場合では、パケット損失の影響により予測誤差が許容誤差を上回った。よって、これら環境ではパケット損失の低下を防ぐための何らかの対策が必要であることが示唆された。

(5) 適応スリープ制御法

PS-MACやTURTLEなどのノードのアクティブ状態になるタイミングを制御する非同期型MACプロトコルに着目する。これらのプロトコルにおいて、各ノードがトラフィックに応じてスリープ期間を設定する適応スリープ制御手法を開発した。この手法は、各ノードが送信待ちキューに存在するパケット数からトラフィックを推定する。高トラフィック時には遅延時間の増加およびパケット到達率の低下を抑制するために、ノードのスリープ期間を短縮する。一方、低トラフィック時にはライフタイムの延長を図るために、スリープ期間を延長する。

① 適応スリープ制御アルゴリズム

アルゴリズム1に示す。各ノードはスリープ期間延長用のカウンタ C_e と短縮用のカウンタ C_s を保持する。 C_e は連続してキューにパケットが蓄積されていない回数を記録するためのカウンタ、 C_s は連続してキューにパケットが一定数以上蓄積されている回数を記録するためのカウンタである。 α_e と β 予め与えるしきい値である。

Algorithm 1 Adaptive Sleep Control

```

{check queue}
if queue_num() = 0 then
   $C_e \leftarrow C_e + 1$ 
   $C_s \leftarrow 0$ 
else if queue_num() >  $\beta$  then
   $C_s \leftarrow C_s + 1$ 
else
   $C_e \leftarrow 0$ 
end if

{reset  $C_e$  when node transmits or receives a packet}
if node transmits or receives a packet then
   $C_e \leftarrow 0$ 
end if

{change  $T_{sleep}$ }
if  $C_e > \alpha_e$  then
   $C_e \leftarrow 0$ 
   $C_s \leftarrow 0$ 
   $T_{sleep} \leftarrow 2 \cdot T_{sleep}$ 
else if  $C_s > \alpha_s$  then
   $C_e \leftarrow 0$ 
   $C_s \leftarrow 0$ 
   $T_{sleep} \leftarrow 0.5 \cdot T_{sleep}$ 
end if

```

② 実機実験結果

住友精密工業社製 neoMOTE 16 台をグリッドに配置し、各ノードに適応スリープ制御を

組み込んだ PS-MAC with ASC を実装して、評価実験を行った。図7に遅延時間特性を、図8にライフタイム特性を示す。適応スリープ制御の効果で、高トラフィック時の遅延時間が大幅に改善されていることが分かった。また、低トラフィック時のライフタイムが延びていることも確認できた。

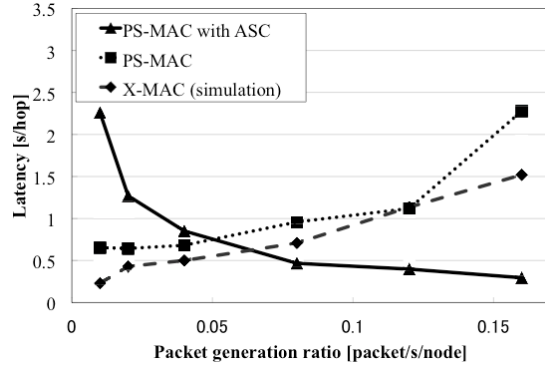


図7：遅延特性

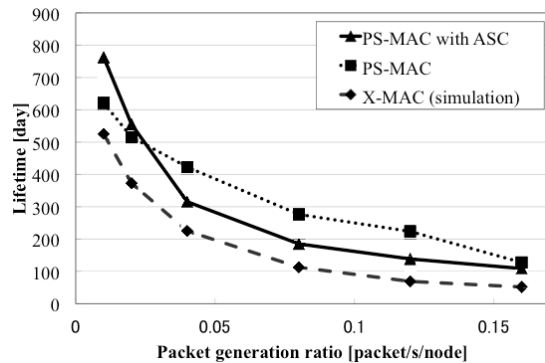


図8：ライフタイム特性

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 高博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “結合エントロピーに基づくデータ集約モデルの導出と省電力センサネットワークへの適用,” 信学論B, Vol. J95-B, No. 02, pp. 238-245, Feb. 2012. (査読有)
- ② 高博昭, 橋本典征, 富田真宏, 上原秀幸, 大平 孝, “アクティブ状態への遷移タイミングを制御する非同期型MACプロトコルのための適応スリープ制御,” 信学論 B, Vol. J95-B, No. 02, pp. 199-207, Feb. 2012. (査読有)

[学会発表] (計18件)

- ① 富田真宏, 高博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “送信待ち時間削減による疑似同期MACプロトコルのための省電力手法の検討,” 信学東海連大, B2-4, Sept. 26, 2011.
- ② 高博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “センサネットワークの省電力化について—トポロ

- ジと集約効果一,” 信学ソ大, B-19-32, Sept. 15, 2011.
- ③ H. Taka, H. Uehara, and T. Ohira, “Intermittent Transmission Method based on Aggregation Model for Clustering Scheme,” Proc. IEEE International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN2011), 2A-4, Dalian, China, June 15-17. 2011.
- ④ 三村恭弘, 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “予測メモリを用いた省電力センサネットワーク,” 信学技報, USN2011-02, May 20, 2011. [USNフレッシュマン賞受賞]
- ⑤ 上原秀幸, 高 博昭, 森 崇彰, “センサネットワークの要素技術と具体例: 協調, 集約, 省電力化,” 信学総大, BT-6-3, Mar. 14, 2011.
- ⑥ 甲斐祐弥, 上原秀幸, “緊急情報の発生を考慮した無線センサネットワークの遅延特性評価,” 信学東海卒研発表会, PA-5, Mar. 9, 2011. [優秀ポスター発表賞受賞]
- ⑦ 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “クラスタリングスキームにおける集約モデルを用いた送信データ量削減手法,” 信学技報, USN2010-66, pp.153-158, Jan. 21, 2011.
- ⑧ 森 崇彰, 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “Chain 型センサネットワークにおける集約率とルート分割による消費電力削減について,” 信学技報, USN2010-35, pp. 91-96, Oct. 29, 2010.
- ⑨ 森 崇彰, 高 博昭, 橋本典征, 上原秀幸, 大平 孝, “センサ情報収集のためのChain 構造における集約率とルート分割について,” 信学総大, B-20-22, Mar. 16-19, 2010.
- ⑩ 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “複数異種センサ環境における低消費電力クラスタリングスキームの提案,” 信学総大, B-20-21, Mar. 16-19, 2010.
- ⑪ 三村恭弘, 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “線形変化に適応した予測カウンタを用いたセンシングシステム,” 信学総大, B-20-6, Mar. 16-19, 2010.
- ⑫ 富田真宏 上原秀幸, “無線センサネットワーク用 TDMA 型 MAC プロトコルの実装について,” 信学東海卒研発表会, P-15, Mar. 9, 2010. [優秀ポスター発表賞受賞]
- ⑬ 三村恭弘, 上原秀幸, “無線センサネットワークにおける予測カウンタを用いた送信回数削減,” 信学東海卒研発表会, OA3-2, Mar. 9, 2010.
- ⑭ N. Hashimoto, H. Uehara, and T. Ohira, “Pseudo-Synchronous MAC Protocol with Adaptive Sleep Control for Wireless

- Sensor Networks,” 2nd International Workshop on Sensor Networks and Ambient Intelligence (SeNAmI 2009), Hiroshima, Japan, Dec. 8-11, 2009.
- ⑮ N. T. T. Nguyen, H. Taka, H. Uehara, and T. Ohira, “Attribute Change Adaptation Routing Protocol for Energy Efficiency of Wireless Sensor Networks,” Proc. International Conference on Information Technology and Applications (ICITA 2009), 18-jp-Nga-067, Hanoi, Vietnam, Nov. 9-12, 2009.
- ⑯ H. Taka, H. Uehara, and T. Ohira, “Node Scheduling Method Based on Aggregation Model for Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks,” Proc. International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2009), S05-3, Sendai, Sept. 7-10, 2009.
- ⑰ 橋本典征, 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “非同期型無線センサネットワークにおける擬似同期 MAC プロトコルの特性評価,” 信学技報, USN2009-14, pp. 13-18, July 16, 2009.
- ⑱ H. Taka, H. Uehara, and T. Ohira, “A Proposal of Node Scheduling Method based on Aggregation Model for Wireless Sensor Networks,” 信学技報, USN2009-12, pp. 1-6, July 16, 2009.

[図書] (計 1 件)

- ① 三瓶, 阪口監修, 分担執筆, “無線分散ネットワーク,” 電子情報通信学会, 215(pp.181-188), 2011.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://www.comm.ee.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上原 秀幸 (Hideyuki UEHARA)
豊橋技術科学大学大学院・工学研究科・
准教授
研究者番号: 00293754

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者