

平成 21 年 3 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560378  
 研究課題名（和文）  
 低消費電力センサネットワークの構築と農業支援への応用  
 研究課題名（英文） Energy-Efficient Communication Technologies for Wireless Sensor Networks and Its Application to Agricultural Research  
 研究代表者  
 上原 秀幸（Hideyuki UEHARA）  
 豊橋技術科学大学・工学部・准教授  
 研究者番号：00293754

## 研究成果の概要：

圃場で観測した土壌水分データの空間相関特性に基づき、センサノードをクラスタリングし、ノード間の協調制御で低消費電力を図るセンサネットワークプロトコルを開発した。具体的には、(1) 観測データの空間相関分布特性に基づくクラスタリング・アルゴリズム、(2) ノード間協調による ON-OFF スケジューリング制御、(3) 環境の変化に対応してクラスタを再構築するアルゴリズム、(4) 省電力化に加え転送遅延とスケラビリティを改善する疑似同期 MAC プロトコルを開発した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 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) MEMS技術の進歩により小型で高性能なセンサを安価に大量生産できるようになったこと、そして安全・安心に対する社会からの要請により、センサネットワークに対する大きな期待が高まってきている。

(2) センサネットワークとは、無線通信機能を持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、環境保全、防災/防犯、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。

(3) センサネットワークは、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、数年から数十年の長期間にわたり運用するためには、低消費電力な無線通信技術が要求される。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問題である。

(4) 我々の住んでいる東三河地域は全国有数

の農業地帯であるが、高齢化に伴う人手不足や気象変動などに対応するため、より安定した生産と経営を実現する技術が求められている。圃場状態を効率的に測定しデータ収集する手段として、センサネットワークに対する期待は大きい。

(5) 関連する先行研究としては、HeinzelmanらのLEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)を始めとするプロトコルがある。これらは、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省電力化を実現している。

(6) 気象データは広範囲で連続的な相関をもつと考えられる。一方、点在する圃場とそこで作付けされている品種の違い、つまりその品種の生育に必要な肥料や水分の違いを考慮すれば、土壌データの相関性は一様でなく不連続性をもつと考えられる。

(7) 空間的な相関分布特性の異なる複数の測定値を効率的に集約するためには、測定対象の相関分布特性に応じたクラスタを要求に応じて適応的に構成するのが良いであろう。つまり、気象データの効率的な収集には距離をベースとした集約を、土壌データの収集には相関をベースとした集約が望ましいと考えられる。

## 2. 研究の目的

(1) 相関分布特性の異なる数種類のデータを測定する環境において、ユーザ要求や環境に応じて階層構造を持つクラスタリングを適応的に構成し、ノード間で協調制御を行う通信プロトコルを開発することを目的とする。

(2) センサネットワークの消費電力を大幅に低減することが可能となり、システムの長期運用が期待できることから、農業支援システムへ応用を目指す。

## 3. 研究の方法

- (1) 圃場データの測定および解析
  - DECAGON EC-5 を用いた測定装置の自作、および土壌水分データの測定
  - 測定データから結合エントロピーを計算、および相関特性の解析
- (2) クラスタリング・アルゴリズムの開発
  - 空間相関に基づきクラスタを構成するアルゴリズムの開発
  - 環境の変化を考慮したクラスタ再構成アルゴリズムの開発
- (3) ON-OFF スケジューリング法の開発
  - 集約モデルの構築
  - アクティブノード数とそれらの配置規範の決定
  - 割当スロット数とスケジューリング・アルゴリズムの開発
- (4) MAC プロトコルの開発
  - 分散同期の確立アルゴリズムの開発

## 4. 研究成果

### (1) 圃場データの測定

東三河農業試験場の圃場（キャベツ畑）において、土質（粘土質、砂土）および定植時期を変えて、3枚の圃場の13地点で土壌含水率を2ヶ月間測定した。空間領域の相関特性を解析したところ、条件の同じ観測値間では強い相関がみられた（図1）。

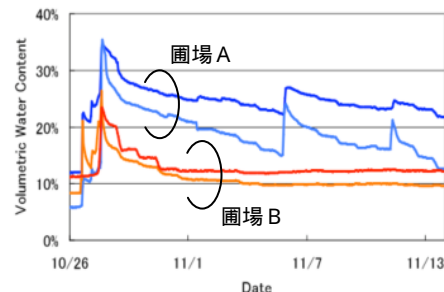


図1：土壌水分データの類似性

しかしながら、同一圃場に同一時期に定植した場合でも生育の違いにより、観測値間の相関が低くなる場合があった。以上の結果から、相関の高い領域ごとや生育の悪い箇所へきめ細やかな灌水を行うことの妥当性が示唆される。ただし、センサを挿す深さやセンサ周囲の状況（空洞や石の有無）による影響がより深刻であることも分かった。これは今後の観測時の課題である。

### (2) 相関性解析と集約モデルの構築

観測データの空間相関特性を解析し、結合エントロピーを導出した。これに基づき、3つのデータ集約モデルを構築した。集約データのエントロピーは次式で与えられる。

$$H_{agg}(M) = H_1 \sum_{i=1}^M \Delta H(i)$$

$$\Delta H(i) = \begin{cases} 1, & i=1 \\ H(v_1, L_{v_i}) - H(v_1, L_{v_{i-1}}), & i>1 \end{cases}$$

ここで、 $H_1$ はセンサノード1つあたりがもつデータの情報量、 $M$ はクラスタ内のノード数、 $v_i$ は*i*番目のセンサノードを指す。 $H(v_1, \dots, v_i)$ は*i*個のノードの結合エントロピーを $H_1$ で正規化したものである。

#### 汎用集約モデル

実測値の二乗平均から次式を得る。ここで、 $a$ 、 $b$ は定数である。

$$\Delta H(i) = \begin{cases} 1, & i=1 \\ a \cdot \exp(b \cdot i), & i>1 \end{cases}$$

#### 完全集約モデル

クラスタ内のノードの観測値の相関がそれぞれ1であり、その特性が時間的に変化しない場合は次式となる。

$$\Delta H(i) = \begin{cases} 1, & i=1 \\ 0, & i>1 \end{cases}$$

この条件は、クラスタメンバの観測値をクラスタヘッドの観測値で代用することが可能であることを意味しており、ネットワーク全体で集約効果が最大となり低消費電力化が見込める。

#### 非集約モデル

クラスタ内のノードの観測値がそれぞれ独立である場合は次式となる。

$$\Delta H(i) = 1, \quad i \geq 1$$

これは、クラスタヘッドではクラスタメンバの観測値を集約することができず、ネットワーク全体で消費電力が最大となるケースである。

(3) CLARIS (Cluster based Adaptive Routing scheme enhanced by Intermittent scheduling and data Similarity)

実環境データの結合エントロピーを計算することで、センサフィールドをいくつかの相関の高い領域 (HCR: Highly Correlated Region) に分割することができることが示された。そこで、消費電力削減のため次の2つの制御を導入したセンサネットワーク用の省電力プロトコル (CLARIS) を開発した。

- ・データ集約効果を高める HCR ごとにクラスタを構成する。
- ・集約モデルを用いて、必要とされる情報量の条件を満たすノード数が決まるため、それらのノードの残存電力を考慮して間欠動作をする。

#### 相関性指標クラスタリング

(i) SINK ノードが各ノードの観測値を基にグルーピングする。各グループ内の最大残存電力のノードをクラスタヘッド候補とする。

(ii) SINK は、CHINFO パケットを用いて、クラスタヘッド候補に関する相関情報(クラスタヘッド ID と観測値の時間平均) を全ノードにブロードキャストする。

(iii) CHINFO パケットを受信したノードは、自ノードがクラスタヘッドになるかどうかを判断する。

(iv) クラスタメンバは CHINFO パケットの情報を基に、相関が高いクラスタヘッドがある場合にはそのクラスタヘッドのクラスタに属し、相関が高いクラスタヘッドがない場合には、もっとも距離が近いクラスタヘッドのクラスタに属する。

#### ON-OFF スケジューリング

クラスタヘッドは、 $H_{agg}(n) \geq T_h$  を満たすノード数  $n$  を求める。ここで、しきい値  $T_h$  は情報量の損失と消費電力削減のトレードオフにより決まる。つまり、 $T_h$  を小さく設定し、より小さな  $n$  を選ぶことによりネットワーク全体での消費電力削減効果を高めることはできるが、データのエントロピーの損失は大きくなる。このとき、要求されるエントロピー量を満たすためのクラスタメンバの

データ送信確率  $prob$ 、クラスタ内のクラスタメンバに割り当てられる平均スロット数  $slots$  は次式で与えられる。

$$\begin{cases} prob = n / (M - 1) \\ slot = prob \cdot frames \end{cases}$$

ここで、 $frames$  は各ノードのデータ送信回数の最大値(1 ラウンド中のフレーム数)である。次に、残存電力の多いノードには多くのスロットを、残存電力の少ないノードには少ないスロットを割り当て、クラスタ全体で上記の式を満足するようにする。また、各クラスタメンバに割り当てられるスロットの間隔は自己相関(時間相関)をもとに決定する。

つまり、あるスロットを使用した後、自己相関がある程度低くなる期間( $period$ )待って次のスロットを割り当てる。

#### 残存ノード数(寿命)の比較

図2は、距離に基づくクラスタリング法である LEACH、相関に基づくクラスタリング法である CLARA、CLARA に間欠動作を導入した CLARIS の3方式の残存ノード数(寿命)を比較したものである。センサフィールドは9個の HCR に分割されており、100個のノードがランダムに配置されている。相関の高い領域に分割されるような環境では、データ間の相関性を積極的に利用することで省電力化が図れ、ネットワークの寿命を大幅に延長することが可能であることが分かる。ただし、HCR 数が多くなるとクラスタ数も増加し、クラスタ内で十分な集約が得られなくなる。従って、クラスタ数とそのメンバ数は環境に応じて最適値を決定する必要がある。

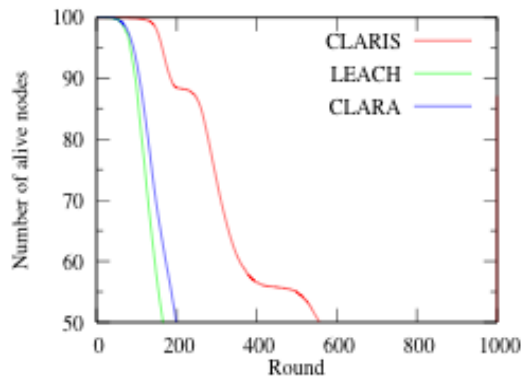


図2: 残存ノード数の比較

(4) ACHIEVE (Attribute CHange Inbuilt Energy saVing clustEring)

ノード間距離やデータ相関を指標としてクラスタを構成するこれまでの省電力プロトコルは、観測する環境の特徴や性質(属性)の変化に対応した方式ではない。そこで、観測している環境の属性の変化に対応してクラスタの再構成を可能とする省電力ルーチング方式 (ACHIEVE) を開発した。本方式は、以下の特徴をもつ。

- ・ CLARISをベースとした相関性指標のクラスタを構成し、クラスタ内のノードは、決められたON-OFFのスケジューリングに従いアクティブ状態とスリープ状態をとる。
- ・ 観測データの変化量が予め定義した値以上の場合、環境の大きな変化があったと判断してクラスタを再構成する。
- ・ シンクまでは他のクラスタヘッドを中継してデータを転送する。

#### 属性の定義

データ相関を指標としてクラスタを構成するため、相関値を属性と定義する。従って環境の時間変化に応じてHCRを特徴づける相関値、つまり属性が変化する。

#### クラスタ再構成法

- シンクが、各ノードから収集したデータから属性を解析し、HCRごとにクラスタを構築する。
- 各クラスタ内に存在するノードから、複数のアクティブノードを選択し、それ以外のノードをスリープ状態にする。ここで、属性変化はHCRの境界から発生すると想定すると、アクティブノードは、クラスタヘッドとアクティブノードが作る多角形の面積が最大となるように選択すればよい。これは、属性の変化を逃さず捉えられるようにするとともに、省電力化のためにできるだけアクティブノード数を少なくするためである。
- 予め設定した値よりも大きな変化量を示した場合に属性が変化したと判断する。
- クラスタヘッドからwakeup信号を全メンバーに広告し、返ってきた観測データをシンクへ転送する。シンクは、これらのデータに基づき属性を再計算する。

#### マルチホップ伝送

HCR数が増加すると、シンクへの長距離通信回数が多くなるために、消費電力が増大してしまうという問題がある。そこで、シンクへ直接通信せずに途中のノードを中継する2ホップスキームを採用し、長距離通信回数の抑制を図る。中継ノードは、次の目的関数に対して、 $f_i(d_i, e_i) > f_j(d_j, e_j)$  を満たすクラスタヘッド*i*である。ここで、 $N_{HCR}$ はクラスタ

$$f_i(d_i, e_i) = \begin{cases} d_i^{-1}, & e_i \geq \sum_{k=1}^{N_{HCR}} e_k / N_{HCR} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ヘッド数、 $d_i$ はクラスタヘッド*i*からシンクまでの距離、 $e_i$ はクラスタヘッド*i*の残存電力を表す。

#### 残存エネルギーの比較

図3に残存エネルギーの比較結果を示す。単位時間あたりに属性が変化する回数(属性変化率)を0.1~0.5とし、この間HCR数は4~9へ変化する。その結果、代表的な距離指標クラスタリング方式であるLEACHと比較して、属性変化率が0.5のときのシステム寿命を約1.5倍、0.1のときは約3倍に延ばすこ

とができることがわかった。さらに、2ホップ伝送することで、それぞれ約2倍、約5倍に延ばせることがわかった。

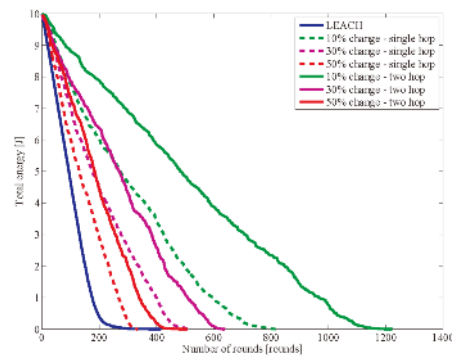


図3：残存エネルギーの比較

#### (5) PS-MAC (Pseudo-Synchronous Medium Access Control)

センサノードのようにあまり大きな送信電力を必要としない場合は、待ち受け状態(アイドルリスニング)での消費電力は、送受信時の消費電力と同程度であり無視できない。従って、センサネットワークの省電力化にはON-OFFの間欠動作は有効な手段である。しかしながら、提案手法はスリープ同期型を想定しており、同期信号の通知に時間がかかるなどのオーバーヘッドが大きい。一方、非同期型のX-MACなどでは、あて先ノードのアクティブ状態が分からないので、送信ノードが何度もプリアンプを送り続けることになり、消費電力と遅延が増大する。そこで、非同期状態から同期信号を用いずに擬似的にスリープのタイミング同期を取り、これらの問題を解決できる擬似同期MACプロトコル(PS-MAC)を開発した。

#### 動作原理

- 送信ノードは中継ノードがリスン状態に移るまでショートプリアンプを断続的に送信する。
- ショートプリアンプを受信した受信ノードはACKを返す。ACKには自ノードの次にリスン状態に移るまでの時間が記されている。
- 送信ノードは、中継ノードがリスン状態に移るまでの時間を知ることにより、次にリスン状態に移るまでの時間を中継ノードより少し早くする。
- 同期したスケジュールを他のノードからの通信により乱されないように、次にリスン状態に移るまでの時間およびスリープに移るまでの時間は、ノードがスリープ状態からリスン状態に移ったときに決定し、同期状態を継続させる。

#### 平均遅延の比較

ノード間距離 20m の 25 ノードのグリッドトポロジー、シンクノードは(0m, 0m)にしているとす。最小ホップ数でシンクノードまで

届ける経路は既知とする。図2に1ホップ当りの平均遅延時間を示す。X-MACに比べて大幅な削減効果が見られる。これは、各ノードが中継ノードと同期することによって無駄なショートプリアンプルの送信が削減されたためである。

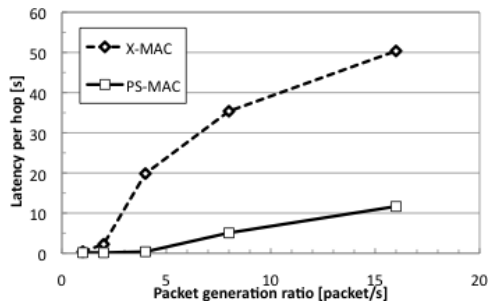


図4：平均遅延時間

#### (6) まとめと今後の展望

数年～数十年の運用が可能で、農業支援への応用を目指した、低消費電力なセンサネットワーク用の通信プロトコルを開発した。具体的には、圃場データの測定から、空間相関特性を解析し、集約モデルを構築した。これをもとに、相関指標によるクラスタリング・アルゴリズムとON-OFFスケジューリング法を開発した。また、環境の変化に対応できるようクラスタを再構成するアルゴリズムも開発した。最後に、遅延特性を改善するために擬似的に同期を確立するアルゴリズムを開発した。以上の成果は、論文誌1編、国際会議1件、国内9件に発表され、高い評価を得ている。

今回、実装実験による評価が十分に行えなかったため、ノード数を増やした規模の大きい場合の実装実験とフィールド実験、また、マルチモーダルセンサへの対応が今後の課題である。

#### 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1件)

(1) Daisuke Maeda, Hideyuki Uehara, and Mitsuo Yokoyama, "Efficient Clustering Scheme Considering Non-uniform Correlation Distribution for Ubiquitous Sensor Networks," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, no. 7, pp. 1344-1352, July 2007. (査読有)

[学会発表](計10件)

(1) 橋本典征, 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," 信学総大, B-20-41, Mar. 2009.  
 (2) 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, "無線セ

ンサネットワークの省電力化のための相関に基づく集約モデルとノードスケジューリングについて," 信学総大, B-20-37, Mar. 2009.

(3) 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送信待ち時間削減のための属性情報を用いた中継ノード制御法," 信学技報, USN2008-44, pp. 33-38, Oct. 2008.

(4) Nga Thi Thanh Nguyen, Hideyuki Uehara, and Takashi Ohira, "A Threshold based Routing Protocol considering the increasing in the number of Highly Correlated Region for Wireless Sensor Network," 信学技報, USN2008-46, pp. 45-50, Oct. 2008.

(5) 橋本典征, 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属性情報を利用した中継ノード選択法," 信学ソ大, B-20-7, Sept. 2008.

(6) Hiroaki Taka, Hideyuki Uehara, and Takashi Ohira, "A Cross Layer Designed Clustering Scheme Exploiting Data Similarity in Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), T06-5, Sendai, Aug. 2008.

(7) Nga Thi Thanh Nguyen, Hideyuki Uehara, and Takashi Ohira, "Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Utilizing Environmental Characteristics," 信学技報, USN2008-2, pp. 7-12, May 2008.

(8) 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, "データ相関を利用した省電力クラスタリングスキームの高相関領域の時間的変化に対する特性評価," 信学総大, B-20-19, Mar. 2008.

(9) 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, "無線センサネットワークにおけるデータの相関性を利用した集中型クラスタリングスキーム," 信学技報, USN2007-55, pp. 1-5, Jan. 2008.

(10) 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, "アクティブノード数を考慮した ON-OFF 方式クラスタリングスキームの提案," 信学ソ大, B-20-21, Sept. 2007.

[その他]

<http://www.comm.ics.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・工学部・准教授  
 研究者番号：00293754

(2)研究分担者

(3)連携研究者