

センサネットワークにおける情報収集のための 消費電力を考慮したクラスタリング手法

上村 純平[†] 若宮 直紀[†] 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科

^{††} 大阪大学サイバーメディアセンター

E-mail: [†]{kamimura,wakamiya}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし センサネットワークにより長期間の観測を行うためには、電力効率のよい情報収集機構が必要不可欠である。センサ端末は主として情報の検出、送信、受信で電力を消費する。特に情報送信の消費電力は通信距離の2乗に比例するため、近接するセンサ端末でクラスタを構成し、クラスタヘッドと呼ばれる代表がクラスタに属するセンサの情報を集約して基地局に情報を送信する、クラスタベースの情報収集機構が有効である。LEACHでは、クラスタメンバからの情報受信および基地局への情報送信による電力消費の大きさを考慮して、クラスタヘッドを交代制にすることにより、センサネットワークの長寿命化を図っている。しかしながら、センサ端末間の残余電力の差異を考慮していない、クラスタ形成に際して領域全体へのブロードキャストが必要であるなど、端末種別や導入時期によって残余電力の異なる多数のセンサ端末からなるセンサネットワークでは効率的な情報収集が行えない。そこで、本稿では、局所的な情報交換にもとづいてセンサ端末が自律分散的に適切なクラスタを構成するクラスタリング手法を提案する。シミュレーションによる評価を通して、クラスタベースの情報収集機構のひとつであるLEACHと比較して、残余電力が均一な場合とばらつきがある場合の両方において、提案手法がより長期間に渡り、多数のセンサから情報収集を行えることを示している。

キーワード センサネットワーク、情報収集、クラスタリング、電力効率、生物システム

Energy-Efficient Clustering Method for Data Gathering in Sensor Networks

Junpei KAMIMURA[†], Naoki WAKAMIYA[†], and Masayuki MURATA^{††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{††} Cybermedia Center, Osaka University

E-mail: [†]{kamimura,wakamiya}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract By deploying wireless sensor nodes and composing a sensor network, one can obtain information of behavior, condition, and position of the region apart. Since sensor nodes operate on batteries, energy-efficient mechanisms for data gathering are indispensable to prolong the lifetime of a sensor network as long as possible. A sensor node consumes its energy in observation of its surroundings, data transmission, and data reception. Cluster-based data gathering mechanisms have been proposed taking into account the fact that energy consumption in data transmission is proportional to the square of radius of radio signal. In clustering sensor nodes, we need to take into account that a cluster head consumes more energy than the others in receiving data from members and sending the aggregated data to a base station. In this paper, we proposed a novel clustering mechanism where clusters are organized in a distributed and energy-efficient way through local communications among neighboring sensor nodes. Through simulation experiments, we showed our mechanism can gather data from many sensor nodes longer than LEACH.

Key words sensor network, data gathering, clustering, energy-efficiency, biological system

1. まえがき

近年, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の発展により, 安価で低消費電力な無線センサ端末が実現されている. 個々のセンサ端末の有する計算能力, メモリ容量, 電力容量には制限があるが, 無線センサ端末を多数配置し, 無線センサネットワークを構築することにより, 離れた領域や物体を正確に観測することができる. センサネットワークは, 計画的, あるいは無作為に配置された数百, 数千の無線通信能力を持つセンサ端末と, センサ端末の観測した情報を収集して取り出すための基地局からなる (図 1). センサ端末の多くは電池で動作すること, また, 多数のセンサ端末の電池を管理, 交換することは困難であることを考慮すると, センサネットワークにより長期間の観測を行うためには, 電力効率のよい情報収集機構が必要である. 情報送信に必要な電力は, 送信距離の 2 乗に比例するため [1], 観測対象から離れた場所に設置された基地局に個々のセンサ端末が直接送信するのは電力効率が悪い. 図 1 に示すように, センサ端末と基地局の距離に比べて, センサ端末間の距離が近いことを考慮すると, 互いに近いセンサ端末でクラスタを形成し, クラスタヘッドと呼ばれる代表がクラスタ内センサ端末の情報を集め, 基地局に情報を送信するクラスタベースの情報収集が効果的である. また, 消費電力は通信量にも比例するため, クラスタヘッドで受信したセンサ情報を集約し, 送信する情報量を減らすことで消費電力を抑えることができる [1, 2].

LEACH [1] では, センサ情報収集に際して, まずある割合のセンサ端末がクラスタヘッドとして立候補し, クラスタに関する情報をセンサネットワーク全体にブロードキャストする. 残るセンサ端末は最も近いクラスタヘッドを選択してクラスタメンバとなり, クラスタを形成する. クラスタヘッドは, 全てのクラスタメンバから受信したそれぞれ n ビットのセンサ情報と, 自身の獲得した n ビットのセンサ情報から, 集約された n ビットの情報を生成し, これを基地局に送信する. また, 過去長期間クラスタヘッドにならなかったセンサ端末の立候補確率を高めることにより, センサ端末が交代でクラスタヘッドを担当する. これにより, センサ端末間の電力消費が一様化され, センサネットワークの長寿命化が達成される. しかしながら, LEACH では全てのセンサ端末の同質性を前提としたクラスタリングを行っており, クラスタ形成において, センサ端末の種別による電力容量の差異, 基地局やクラスタヘッドとの距離の違いによる消費電力の差異, 導入時期による残余電力の差異などを考慮していない. また, クラスタヘッドに立候補するセンサ端末の割合は, センサネットワークのトポロジやセンサ情報の大きさなどによって事前に設定しなければならないため, センサ端末の停止, 移動, 追加によるセンサネットワークの変化や情報量の変化などに対応できない. さらにクラスタヘッドへの立候補はセンサネットワーク全体へのブロードキャストによって行われるため, 多くの電力を必要とする.

多数の様々なセンサ端末からなるセンサネットワークにおいては, 集中型の制御は現実的でなく, それぞれのセンサ端末が

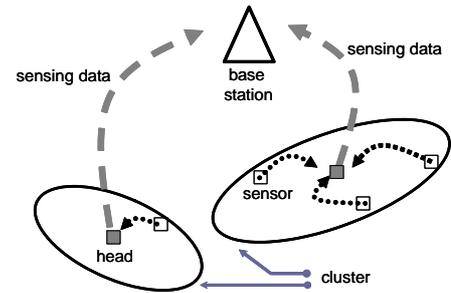


図 1 センサネットワーク

局所的な情報のやりとりを通して, 自律的に適切なクラスタを構成するクラスタリング手法が必要不可欠である. クラスタリングやグラフ分割など, 互いの相関を定義することのできる要素の集合をなんらかの指標に基づいて分類する問題に対し, 社会性昆虫の行動に着想を得た解法が提案がされている [3, 4]. [3] では, 蟻が互いに化学物質を交換, 伝達することにより相手の個体と同じ巢の仲間か否かを識別するという現象 (colonial closure) に基づくクラスタリングアルゴリズム ANTCLUST を提案し, オブジェクトのクラスタリングにおいて K-Means アルゴリズムよりもよい結果を示している.

そこで本稿では, ANTCLUST の考え方を利用して, 残余電力の様々に異なるセンサ端末からなるセンサネットワークにおいて, 個々のセンサ端末が局所的な情報のやり取りに基づいて自律的に判断することにより効率のよいクラスタを形成するクラスタリング手法を提案する. 提案手法では, 残余電力が大きいセンサ端末がクラスタヘッドになり, 他のセンサ端末は, センサ端末間の情報交換を通して, より残余電力が大きく, より近いクラスタヘッドを有する, よりメンバ数の少ないクラスタに所属する. その結果, センサ端末間の残余電力を均一化し, センサネットワークの長寿命化が達成される.

以降では, まず 2 章で本稿で対象とするセンサネットワークについて述べる. 続く 3 章で, ANTCLUST のアルゴリズムを紹介する. 4 章において残余電力を考慮した電力効率のよいクラスタリング手法を提案し, 5 章では, シミュレーションにより提案手法の有効性を示す. 最後に 6 章で, 本稿をまとめ, 今後の課題を述べる.

2. センサネットワーク

本稿では, 定期的, あるいは必要に応じて, センサネットワーク全体からセンサ情報を収集するアプリケーションを対象とした, クラスタリングにもとづく情報収集機構のためのクラスタリング手法を提案する. センサ端末は, 無作為に配置され, また, 任意のタイミングで追加されるため, 事前にセンサ端末の位置を知ることはできない. ただし, GPS や位置検出機構により, 自身の位置を知ることができるものとする [5, 6]. センサ端末は, 有限容量で交換不能な電源を有しており, 端末種別や導入時期により残余電力が異なる. 全てのセンサ端末は, 無線送受信機を有しており, 送信電力を制御することにより, 任意のセンサ端末や基地局に直接情報を送信することが可能であ

る．また，全てのセンサ端末は，複数の情報を集約して一つ分の大きさにまとめることができるものとする．

センサ端末の電力消費モデルは [1] と同じものを用いる．センサ端末は，無線送受信機の動作に E_{elec} (nJ/bit)，送信機の信号増幅に ε_{amp} (pJ/bit/m²) の電力を必要とする．無線送信機の電力制御により，送信距離に到達する最小の電力で送信を行えるものとする．したがって， k bit の情報を距離 d の範囲にブロードキャストしたときの消費電力 $E_{Tx}(k, d)$ ，および k bit の情報を受信したときの消費電力 $E_{Rx}(k)$ は，それぞれ式 (1)，式 (2) で表される．

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (2)$$

また，センサ情報の集約には， E_{fuse} (nJ/bit/message) の電力を要する．

3. ANTCLUST

蟻は，個体，種，環境などによって異なる化学物質 (colony odor) を生成し，自らの表皮に塗布している．他の蟻と遭遇すると，この化学物質を互いに交換，比較することにより同じ巣に属する仲間か，そうでないかを判別する．化学物質は遭遇によって更新されるため，巣の中で他の蟻との遭遇を繰り返すことにより，適切に仲間の蟻を識別することのできる化学物質を持つようになる [7, 8]．

ANTCLUST では，類似度 $Sim(i, j) = [0, 1]$ を定義できるオブジェクトの集合に対し，オブジェクトを蟻，クラスタを巣とみなし，蟻の化学物質による仲間識別の仕組みを応用したクラスタリングを行う．それぞれのオブジェクトは，クラスタの識別子 $Label_i$ ，仲間を識別するための基準となる類似度の閾値 $Template_i$ ，クラスタサイズの見積 $M_i = [0, 1]$ ，およびクラスタの安定性を表す $M_i^+ = [0, 1]$ をパラメータとして持っている．ANTCLUST では，ランダムに 2 つのオブジェクトを選択し，遭遇させる．遭遇したオブジェクトは互いの類似度，および閾値などのパラメータにもとづき，同一クラスタに属するかどうかを判定する．十分大きな回数の遭遇を繰り返すことにより，クラスタが生成，統合，廃棄され，オブジェクトは類似度のより高いものからなるクラスタに所属するようになる．

以下に遭遇時の動作を述べる．まず，遭遇したオブジェクト i と j は，類似度 $Sim(i, j)$ とそれぞれの $Template_i, Template_j$ によって相手を受理，もしくは拒絶する．

$$Acceptance(i, j) \Leftrightarrow (Sim(i, j) > Template_i) \wedge (Sim(i, j) > Template_j) \quad (3)$$

なお， $Template_i, Template_j$ は次式により更新される．

$$Template_i \leftarrow \frac{\overline{Sim(i, \cdot)} + Max(Sim(i, \cdot))}{2} \quad (4)$$

$$Template_j \leftarrow \frac{\overline{Sim(j, \cdot)} + Max(Sim(j, \cdot))}{2} \quad (5)$$

$\overline{Sim(x, \cdot)}, Max(Sim(x, \cdot))$ はそれぞれ，オブジェクト x がそ

れまでにそれまでに遭遇したオブジェクトとの類似度の平均値，最大値を示す．

次に，互いの $Label$ を比較し，クラスタを生成，統合，廃棄する．クラスタに属していないオブジェクト同士で受理が起こった場合は，クラスタの生成を行う．

$$Label_i \leftarrow Label_{NEW}, Label_j \leftarrow Label_{NEW}, \quad (6)$$

$$\text{if } (Label_i = Label_j = 0) \wedge (Acceptance(i, j) = True)$$

一方のオブジェクトがクラスタに属しておらず受理が起こった場合は，そのオブジェクトは他方のクラスタに帰属する．

$$Label_i \leftarrow Label_j, \quad (7)$$

$$\text{if } (Label_i = 0 \wedge Label_j \neq 0) \wedge (Acceptance(i, j) = True)$$

同じクラスタに属するオブジェクト同士で受理が起こった場合は，クラスタの規模を拡大する．

$$M_i \leftarrow (1 - \alpha)M_i + \alpha, M_j \leftarrow (1 - \alpha)M_j + \alpha, \quad (8)$$

$$M_i^+ \leftarrow (1 - \alpha)M_i^+ + \alpha, M_j^+ \leftarrow (1 - \alpha)M_j^+ + \alpha,$$

$$\text{if } (Label_i = Label_j \neq 0) \wedge (Acceptance(i, j) = True)$$

同じクラスタに属するオブジェクト同士で拒絶が起こった場合は，クラスタへの帰属度を低下させる．

$$M_i \leftarrow (1 - \alpha)M_i + \alpha, M_j \leftarrow (1 - \alpha)M_j + \alpha, \quad (9)$$

$$M_i^+ \leftarrow (1 - \alpha)M_i^+, M_j^+ \leftarrow (1 - \alpha)M_j^+,$$

$$\text{if } (Label_i = Label_j) \wedge (Label_i \neq 0)$$

$$\wedge (Label_j \neq 0) \wedge (Acceptance(i, j) = False)$$

さらに，帰属度の低いオブジェクト $x = (x | M_x^+ = Min_{k \in [i, j]} M_k^+)$ はクラスタを失う．

$$Label_x \leftarrow 0, M_x \leftarrow 0, M_x^+ \leftarrow 0 \quad (10)$$

異なるクラスタに属するオブジェクト同士で受理が起こった場合は，クラスタの規模を縮小する．

$$M_i \leftarrow (1 - \alpha)M_i, M_j \leftarrow (1 - \alpha)M_j, \quad (11)$$

$$\text{if } (Label_i \neq Label_j) \wedge (Acceptance(i, j) = False)$$

さらに，小さいクラスタのオブジェクト $x = (x | M_x = Min_{k \in [i, j]} M_k)$ はクラスタを変更する．

$$Label_x \leftarrow Label_{(k | k \in (i, j), k \neq x)} \quad (12)$$

以上に挙げた以外の遭遇では，何も行わない．

ANTCLUST では，オブジェクト集合全体やクラスタに関する直接的な知識を必要とすることなく，それぞれのオブジェクトが，他のオブジェクトとの相関関係にもとづいてクラスタを生成，統合，廃棄することにより，全体として適切なクラスタが構成される．

4. ANTCLUST に基づくセンサ端末クラスタリング手法

4.1 提案手法の概要

本稿では，センサネットワークにおいて，ANTCLUST での

巣をクラスタ、蟻をセンサ端末、遭遇を無線通信、類似度を距離の近さとそれぞれ見なすことにより、自律的にクラスタを構成する手法を提案する。ただし、ANTCLUST では遭遇したオブジェクトが互いに相手を受信、拒絶し、いずれもがクラスタの調整を行うのに対し、センサネットワークでの遭遇はセンサ端末のブロードキャストによって起こるため、一対多で一方であり、情報の受信側のみがクラスタの調整を行う。

提案手法では、クラスタヘッド立候補フェーズ、クラスタ形成フェーズの2つのフェーズを経てクラスタを構成する。1回の情報収集(ラウンドと呼ぶ)は、(i) クラスタヘッド立候補フェーズ、(ii) クラスタ形成フェーズ、(iii) 参加登録フェーズ、および(iv) 情報収集フェーズからなる。なお、参加登録フェーズ、および情報収集フェーズは LEACH と同じである。クラスタヘッド立候補フェーズでは、クラスタヘッドとなるセンサ端末が、センサ端末の識別子、残余電力、座標を限られた範囲にブロードキャストする。ラウンドの開始時には、全てのセンサ端末は自らをクラスタヘッドと見なすが、残余電力の多いセンサ端末がより早く立候補するとともに、他のブロードキャストを受信したセンサ端末が立候補をとりやめることにより、残余電力の多いセンサ端末がクラスタヘッドになる。クラスタ形成フェーズでは、クラスタヘッドではないいくつかのセンサ端末がクラスタに関する情報をブロードキャストする。周囲のセンサ端末は、自らのクラスタに関する情報と受信した情報にもとづき、所属するクラスタを決める。続く参加登録フェーズでは、LEACH と同様に、センサ端末はクラスタヘッドに自らを登録する。クラスタヘッドは、メンバが情報送信する TDMA のスケジュールをブロードキャストでクラスタ内に通知する。情報収集フェーズでは、TDMA によりセンサ端末がクラスタヘッドに情報を送信する。クラスタヘッドは全てのセンサ情報を受信後、これらを集約して基地局に送信する。なお、クラスタヘッドへのセンサ情報送信を除き、全ての通信は CSMA を用いたブロードキャストによって行われる。また、信号の干渉を防ぐため、クラスタ間では CDMA による多重化を行う。全てのセンサ端末は同じタイミングでラウンドを開始し、順次フェーズを切り替えていく。

LEACH では、それぞれのラウンドにおいて、センサネットワーク内のある割合のセンサ端末が、立候補のためのセンサネットワーク全体へのブロードキャストにより電力を消費する。一方、提案手法では、一部のセンサ端末がクラスタヘッド立候補のための近傍へのブロードキャストにより、また、他のセンサ端末では、その一部が、遭遇のためのブロードキャストにより、それぞれ電力を消費する。したがって、提案手法において、クラスタ形成のための電力消費を抑えるためには、それぞれのブロードキャストの範囲を抑えると同時に、より少ない遭遇でのクラスタリングを行わなければならない。

ANTCLUST では、クラスタ形成が収束するまでオブジェクトの遭遇を繰り返すが、センサネットワークにおいては、電力消費を抑えるために、一回のクラスタ形成あたりの遭遇回数を制限しなければならない。それぞれのラウンドで前のラウンドのクラスタ形成フェーズ終了時の状態からクラスタ形成を継続

できれば、ラウンドを経るにしたがって、よりよいクラスタが形成されることが期待される。しかしながら、クラスタの登録、クラスタメンバからの情報収集および集約、基地局への情報送信により、全てのセンサの残余電力が変化するため、クラスタヘッドの交代が必要となり、手順が煩雑になるとともに、多くの電力が消費される。そこで本稿では、ラウンドごとにクラスタを再形成する。そのため、ラウンドの繰り返しによる効果はあまり期待できず、ラウンドごとになるべく多くの遭遇を繰り返すことが必要となる。

続く節では、クラスタ立候補フェーズとクラスタ形成フェーズの詳細を述べる。なお、センサ端末は、固有の識別子 i 、残余電力 e_i 、座標 l_i を持つ。また、クラスタ形成のため、クラスタヘッドの識別子 $head_i$ 、クラスタヘッドの残余電力 E_i 、クラスタヘッドの座標 C_i 、クラスタのメンバ数の見積値 M_i 、閾値 $Template_i$ 、クラスタヘッドへの立候補確率 P_i を管理する。閾値 $Template_i$ およびクラスタヘッド立候補確率 P_i は、センサ端末の導入時にある値で初期化され、センサ端末の動作中、順次更新されていくが、他のパラメータは、ラウンドごとに初期化される。また、各センサ端末は、センサネットワークへの導入時にクラスタヘッド立候補のブロードキャストの半径 R 、遭遇のためのクラスタ情報のブロードキャストの半径 r 、ブロードキャストを行うセンサの割合 P_{ex} を与えられる。

4.2 クラスタヘッド立候補フェーズ

ラウンドの開始時には、全てのセンサ端末は、自らをクラスタヘッドとみなす。

$$head_i \leftarrow i, E_i \leftarrow e_i, C_i \leftarrow c_i, M_i \leftarrow 1 \quad (13)$$

センサ端末は、クラスタヘッドに立候補する。クラスタの情報として、クラスタヘッドの識別子 $head_i$ 、クラスタヘッドの残余電力 E_i 、クラスタヘッドの座標 C_i 、クラスタのメンバ数の見積値 M_i 、自分の残余電力 e_i を半径 r の範囲にブロードキャストする。立候補したセンサ端末は、そのラウンドで必ずクラスタヘッドになるものとする。クラスタヘッドにまだ立候補していないセンサ端末は、ブロードキャストを受信すると、立候補を取りやめ、そのクラスタに所属する。すでにクラスタに所属しているセンサ端末がさらに立候補のブロードキャストを受信した場合には、これを遭遇とみなし、次節のクラスタ形成フェーズで述べる動作によりクラスタを調整する。

電力消費の均一化のためには、クラスタヘッドへの立候補は残余電力の多いものから行うことが望ましい。そのため、クラスタヘッド立候補フェーズを n 個のタイムスロットに分割し、センサ端末は、 $n(1 - P_i)$ 番目のスロットで立候補するものとする。立候補したセンサ端末は、クラスタヘッドへの立候補確率 P_i を下げる。

4.3 クラスタ形成フェーズ

クラスタヘッドに立候補しなかったセンサ端末のうち、 P_{ex} は所属しているクラスタの情報を半径 r の範囲にブロードキャストする。このセンサ端末の選出には、LEACH におけるクラスタヘッドの立候補と同じ手法を用いる。

センサ端末 i が、センサ端末 j のブロードキャストを受信し

たとする．遭遇は，一対多で一方のみ起こるので，動作を起こすのは，センサ端末 i のみである．センサ端末 i がクラスタヘッドに立候補していない場合，所属するクラスタを調整する．まず，センサ端末 i はセンサ端末 j の属するクラスタのクラスタヘッド $head_j$ と自身との距離を閾値 $Template_i$ と比較し，受理，拒絶を判定する．

$$Acceptance(i, j) \Leftrightarrow (d(i, head_j) \leq Template_i) \quad (14)$$

ただし， $d(i, head_j)$ はセンサ端末 i とクラスタヘッド $head_j$ との距離を表し，それぞれの座標から算出する．受理の場合は，センサ端末 j の所属しているクラスタの情報と自身の所属しているクラスタを比較する．同じクラスタに属するセンサ端末を受理した場合は，クラスタの拡大を行う．

$$M_i \leftarrow M_i + 1, \quad (15)$$

$$\text{if } (head_i = head_j) \wedge (Acceptance(i, j) = True)$$

異なるクラスタに属するセンサ端末を受理した場合は，センサ端末 i に比較的近い場所に別のクラスタが存在するため，自身のクラスタと比較してよりよいと判断したクラスタへ所属する．センサネットワークの長寿命化のためには，より近く，より残余電力の大きいクラスタヘッドを有する，よりメンバ数の少ないクラスタに属するのがよい．

$$head_i \leftarrow head_j, E_i \leftarrow E_j, C_i \leftarrow C_j, M_i \leftarrow M_j + 1, \quad (16)$$

$$\text{if } (head_i \neq head_j) \wedge (Acceptance(i, j) = True) \wedge \left(\frac{E_j}{M_j \cdot d^2(i, head_j)} \geq \frac{E_i}{M_i \cdot d^2(i, head_i)} \right) \quad (17)$$

これ以外のブロードキャストを受信したときには何も行わない．

クラスタヘッドに立候補しているかどうかに関わらず，センサ端末 i はクラスタヘッドへの立候補確率 P_i をセンサ端末 j の残余電力 e_j と自身の残余電力 e_i との関係により更新する．

$$P_i = \begin{cases} P_i + p, & \text{if } e_i > e_j \\ P_i - p, & \text{if } e_i < e_j \\ P_i, & \text{if } e_i = e_j \end{cases} \quad (18)$$

ここで p は， $p = [0, 1]$ を満たす定数である．次に閾値 $Template_i$ を更新する．

$$Template_i = \frac{\overline{d(i, \cdot)} + \text{Max}(d(i, \cdot))}{2} \quad (19)$$

ここで， $\overline{d(i, \cdot)}$ ， $\text{Max}(d(i, \cdot))$ は，それぞれセンサ端末 i がこれまでにブロードキャストの受信により得たすべてのクラスタ情報におけるクラスタヘッドとの距離の平均値と最大値を表す．

5. シミュレーションによる評価

シミュレーションにより，提案手法の有効性を評価する．図 2 に示すような， 50×50 の領域の格子点上にランダムに 100 個のセンサ端末を配置し，基地局の座標を (25,150) としたセンサネットワークを対象とした．センサ端末の初期残余電力は，全て 0.5 J で均一な場合と， $0.2 \text{ J} \sim 0.5 \text{ J}$ の範囲でランダム

に設定した場合について評価した．消費電力モデルとしては， $E_{elec} = 50 \text{ (nJ/bit)}$ ， $\varepsilon_{amp} = 100 \text{ (pJ/bit/m}^2)$ ， $E_{fuse} = 5 \text{ (nJ/bit/message)}$ を用いた．センサ端末が送信する情報の大きさは， 2000 bit とした．また，以降のグラフでは，それぞれの初期電力設定についてシミュレーションを 100 回繰り返した平均値を示す．

図 3 に，残余電力を均一とし，クラスタヘッドへの立候補のブロードキャストの半径 R を 20~70 と変化させた場合のラウンド数と生存センサ端末数の関係を示す．なお，遭遇のためのクラスタ情報のブロードキャストの半径 r は 20，ブロードキャストを行うセンサ端末の割合 P_{ex} は 10% で固定とした．図より，立候補の際のブロードキャストの半径 R を 40 とすることにより，より長期間，多くのセンサ端末からセンサ情報を収集し続けられることがわかる．

図 4，および図 5 に，残余電力を均一とし，ブロードキャストを行うセンサ端末の割合 P_{ex} を 0%~20% と変化させた場合のラウンド数と生存センサ端末数の関係を示す．なお，クラスタヘッド立候補のためのブロードキャストの半径 R は図 4 では 20，図 5 では 40 とし，遭遇のためのクラスタ情報のブロードキャストの半径 r は 20 で固定とした．図 4 においては，クラスタ情報のブロードキャストによる遭遇が増えることにより，電力効率のよいクラスタが形成され，より長期間多くのセンサが生存している．一方，図 5 においては，センサ端末がクラスタ情報をブロードキャストし，クラスタを調整する効果が小さい．これは，クラスタヘッドへの立候補のためのブロードキャストの半径が大きくなることにより，遭遇によって有効なクラスタ調整が行われない一方で，電力を消費するためである．

図 6 に，LEACH と提案手法における，残余電力が均一な場合，および不均一な場合のラウンド数と生存センサ端末数の関係を示す．なお，LEACH におけるクラスタヘッドの割合は 5% とした [1]．また，提案手法では，立候補の際のブロードキャストの半径 R を 40，遭遇のためのクラスタ情報のブロードキャストの半径 r を 20，ブロードキャストを行うセンサ端末の割合 P_{ex} を 5% とした．残余電力によらず，提案手法は，電力枯渇によりセンサ端末が早く停止し始めるが，LEACH よりも長い期間に渡って，より多くのセンサ端末が生存していることがわかる．例えば，センサ端末の生存率が 80% を超えるラウンド数は，提案手法が 20~30% 程度 LEACH を上回っている．センサネットワークでは，クラスタヘッドとなったセンサ端末はクラスタメンバの台数や基地局への距離により，また，その他のセンサ端末においてもクラスタヘッドとの距離により，情報収集の際に消費する電力は様々に異なる．LEACH では，どのセンサ端末も等しい確率でクラスタヘッドになるため，残余電力の少ないセンサ端末もクラスタヘッドに選出され，電力が枯渇し，停止してしまう．一方，提案手法では，残余電力の大きいセンサ端末が積極的にクラスタヘッドになり，残余電力が僅少なセンサ端末はクラスタヘッドにならずに電力消費を抑えるため，センサ端末の残余電力が均一化され，センサネットワークの長寿命化が達成される．

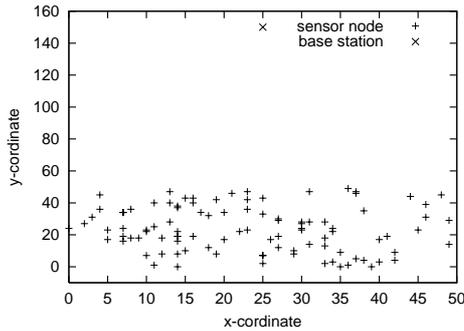


図2 100 ノードからなるセンサーネットワーク

6. まとめ

本稿では、個々のセンサ端末が局所的な情報のやり取りにもとづいて自律的に判断することにより効率のよいクラスタを形成するクラスタリング手法を提案した。提案手法では、残余電力が大きいセンサ端末がクラスタヘッドになり、他のセンサ端末は、センサ端末間の情報交換を通して、より残余電力が大きく、より近いクラスタヘッドを有する、よりメンバー数の少ないクラスタに所属する。シミュレーションによる評価の結果、提案手法は LEACH よりも長い期間に渡って多くのセンサ端末から情報を収集することが可能であり、よい性能を示すことがわかった。今後の課題として、領域の大きさやセンサ密度などに適したパラメータをセンサ端末が自律的に判断、選択することにより、センサネットワークの動的な変化への適応性を高める手法について検討する。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム (研究拠点形成費補助金) の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 3005–3014, January 2000.
- [2] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. Sivalingam, "Data gathering in sensor networks using the energy*delay metric," in *IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, pp. 924–935, April 2001.
- [3] N. Labroche, N. Monmarch'e, and G. Venturini, "A new clustering algorithm based on the chemical recognition system of ants," in *Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence*, pp. 345–349, July 2002.
- [4] A. E. Langham and P. W. Grant, "A multilevel k-way partitioning algorithm for finite element meshes using competing ant colonies," in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, vol. 2, pp. 1602–1608, July 1999.
- [5] A. Savvides, C. Han, and M. Strivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors," in *Proceedings of Mobicom 2001*, pp. 166–179, July 2001.
- [6] A. Nasipuri and K. Li, "A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks," in *Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking/The first ACM international workshop on*

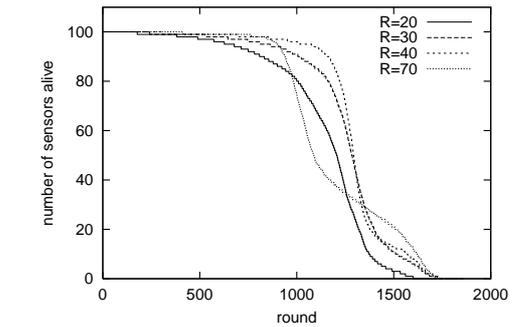


図3 クラスタヘッドへの立候補のブロードキャストの半径 R によるラウンド数と生存センサ端末数の変化 ($P_{ex} = 10\%$, $r = 20$)

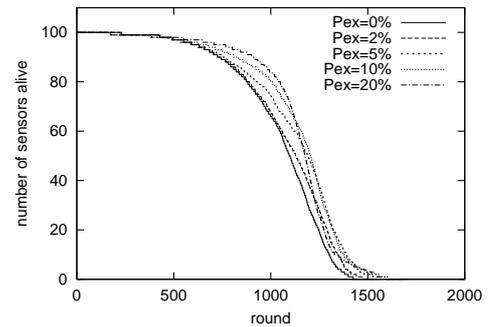


図4 遭遇のためのブロードキャストを行うセンサ端末の割合 P_{ex} によるラウンド数と生存センサ端末数の変化 ($R = 20$, $r = 20$)

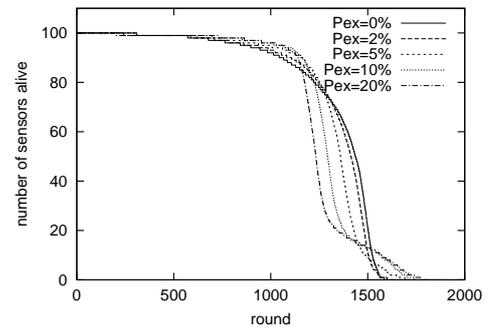


図5 遭遇のためのブロードキャストを行うセンサ端末の割合 P_{ex} によるラウンド数と生存センサ端末数の変化 ($R = 40$, $r = 20$)

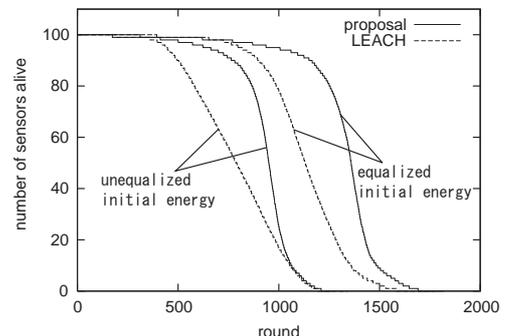


図6 ラウンド数と生存センサ端末数による LEACH との比較

Wireless Sensor Networks and Applications, pp. 105–111, September 2002.

- [7] 山岡亮平, "アリの社会とコミュニケーション," *ネイチャーインタフェイス*, no. 6, pp. 58–61, 2001.
- [8] 山岡亮平, "アリは仲間をどう見分けるか?," *生命誌*, no. 23, 1999.