

特集 情報システム

原著論文

無線センサネットワークにおける隣接ノードの 残存電力と距離を用いたクラスタリング方式

花田真樹*・金光永煥**・鈴木英男*

要旨: 近年、無線通信端末の小型化、低価格化、高性能化に伴い、無線センサノードにより構成される無線センサネットワークが注目を集めている。無線通信端末（センサノード）はバッテリー容量が少ないため、電源が供給されない場所にセンサノードを設置した場合、ネットワークを長期間稼働させるための消費電力の低減化が必要となる。ネットワークの長寿命化を目的とした手法として、様々なクラスタリング手法が提案されているが、これらの手法では残存電力の偏りに柔軟に対応できない可能性がある。本論文では、ネットワークの長寿命化を目的とし、センサノードの残存電力とセンサノード間距離を考慮したクラスタリング方式を提案する。評価実験では、ネットワークの長寿命化の観点から、従来方式と比較し、有効性を示す。

キーワード: 無線センサネットワーク, クラスタリング, 省電力

Clustering Algorithm Using Remaining Energy and Distance of Adjacent Nodes in Wireless Sensor Networks

Masaki HANADA*, Hidehiro KANEMITSU** and Hideo SUZUKI*

Abstract: In recent years, wireless sensor network (WSN), which is composed of sensor nodes, has much attention by cost reduction, downsizing and performance improvement of wireless communication devices. In WSN, when sensor nodes are placed in the non-power supply conditions, they need to save electrical energy in order to extend lifetime of the network because battery capacity is limited. Various clustering algorithms have been proposed to extend lifetime of the network in previous literature. However, there is a possibility that these algorithms cannot cope with energy deviation efficiently. In this paper, we propose a clustering algorithm using remaining electrical energy and distance of adjacent sensor nodes for extending lifetime of the network. In evaluation simulations, we show that the proposed clustering algorithm outperforms previous clustering algorithms in terms of extending the lifetime of the network.

Keywords: Wireless Sensor Network, Clustering, Energy Efficiency

*東京情報大学 総合情報学部
Faculty of Informatics, Tokyo University of Information Sciences

**東京工科大学 コンピュータサイエンス学部
Faculty of Computer Science, Tokyo University of Technology

2018年5月15日受付
2018年8月2日受理

1. はじめに

近年、無線通信端末の小型化、低価格化、高性能化に伴い、無線センサノードにより構成される無線センサネットワークが注目を集めている。無線センサネットワークとは、無線センサノードを実世界空間に分散配置してセンシングを行うネットワークであり、センシング対象は、工業製品、装置、道路、建物、橋、トンネル、家電、森林、農地など多岐にわたる[1]-[3]。無線センサネットワークの技術課題の1つとして、消費電力の低減化がある。無線通信端末（以降、センサノードと呼ぶ）はバッテリー容量が少ないため、電源が供給されない場所にセンサノードを設置した場合、ネットワークを長期間稼働させるための消費電力の低減化が必要となる[1]-[3]。

この問題を解決する省電力化手法の1つとして、クラスタリング手法がある。クラスタリング手法では、ネットワークを複数のクラスタに分割し、各クラスタ内でクラスタヘッドを選出する。選出されたクラスタヘッドは、クラスタ内のセンサノードからデータを収集し、シンクノードへ送信する。なお、シンクノードとは、ネットワーク内の全てのセンサノードのデータを集約するノードのことである。クラスタヘッドが、クラスタ内の他のセンサノードから収集したデータをまとめてシンクノードへ送信することで、消費電力の低減化を実現している。

クラスタリング手法に関しては、従来より、多くの手法が提案されている。代表的な手法として、LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[4]やHEED (Hybrid, Energy-Efficient Distributed clustering)[5]がある。LEACH[4]では、クラスタヘッドを確率的に選出し、センサノードからクラスタヘッドまでの距離を指標としてクラスタリングを行う。これにより、クラスタは、クラスタヘッドとそのクラスタヘッドから近い距離にあるセンサノードで構成されることになる。あるセンサノードがクラスタヘッドである期間はラウンドと呼ばれ、ラウンド毎にクラスタヘッドを変更することでネットワーク内のセンサノードの残存電力の偏りを抑えている。しかしながら、各センサノードからクラスタヘッドまでの距離やラウンド毎のクラスタ数が異なるため、センサノードの残存電力に偏りが生じる可能性がある。この問題を解決するために、センサ

ノードからクラスタヘッドまでの距離に加えて、センサノードの残存電力も考慮しクラスタリングを行うHEEDがある。HEED[5]では、各センサノードの残存電力を考慮した確率を用いて、クラスタヘッドを選出する。クラスタヘッドの状態は、暫定クラスタヘッドと最終クラスタヘッドの2種類を用いて表現される。最終クラスタヘッドに選出される過程で、他のクラスタに属した方がよいと判断した場合は、他のクラスタに属することが可能である。これにより、ネットワーク内のセンサノードの残存電力の偏りを抑えている。しかしながら、HEEDでは、LEACHより低い確率ではあるが、残存電力の少ないセンサノードがクラスタヘッドに選出される可能性がある。残存電力の少ないセンサノードがクラスタヘッドに選出された場合、データの送受信中に残存電力がなくなる可能性が高くなる。また、残存電力の多い複数のセンサノード同士が通信範囲内に存在していた場合、その内の1つのセンサノードのみがクラスタヘッドに選出されるため、他の残存電力の多いセンサノードを有効利用できない。

本論文では、上述したHEEDの問題を解決するために、残存電力が一定以下のセンサノードがクラスタヘッドに選出されないように制御し、更に、残存電力の多い複数のセンサノード同士が通信範囲内に存在していた場合、これらのセンサノードがクラスタヘッドに選出されるように制御するクラスタリング手法を提案する。評価実験では、計算機シミュレーションにより、提案方式と従来方式 (LEACH, HEED) の比較を行い、ネットワークを長期間稼働させることが可能であることを示す。

本論文では、まず2.で従来研究について述べる。3.では、提案方式について述べる。4.で、提案方式と従来方式の比較を行い、提案方式の有効性を示す。5.で、まとめと今後の課題について述べる。

2. 従来研究

本章では、従来研究で提案されているクラスタリング手法について述べる。文献[6]では、既存のクラスタリング手法をブロック型、グリッド型、チェイン型の3つのカテゴリに分類している。1.で述べたLEACHとHEEDはブロック型の代表的なクラスタリング手法である。また、最近ではLEACHをベースに改良を行ったLEACH-MAC[7]が提案

されている。LEACH-MACはクラスタヘッドからシンクノードまでのデータ送信に必要な消費電力を見積り、その消費電力に基づいてクラスタヘッドの選出を複数回実施する手法である。この手法は、消費電力算出が複雑であり、加えて、消費電力の見積りに誤差が生じた場合、プロトコル自体が正常に動作しない可能性がある。本論文では、ブロック型のクラスタリング手法を研究対象とするため、LEACHとHEEDに関しては、2.1と2.2で詳細に述べる。グリッド型の代表的なクラスタリング手法としてPANEL[8]があり、チェーン型の代表的なクラスタリング手法としてPEGASIS[9]がある。PANELは位置情報を用いて、事前に格子状のクラスタを構成する。負荷分散のために、各クラスタにおけるリファレンスポイントが計算され、そのポイントに最も近いセンサノードがクラスタヘッドに選出される。データは、経路表を用いてシンクノードへ送信される。PEGASISは位置情報を用いて、最も近いセンサノード同士を接続し、チェーンを構成する手法である。データはチェーンに沿ってシンクノードへ送信される。グリッド型またはチェーン型のクラスタリング手法では、一般的に、位置情報が用いられるため、位置情報取得のためのGPS機器が必要となる。

2.1 LEACH

LEACHは、大きくクラスタ形成フェーズとデータ送信フェーズの2つのフェーズから構成される。以下では、LEACHのアルゴリズムについて述べる。

・クラスタ形成フェーズ

センサノード n は、次式(1)に示す確率 $T(n)$ に従ってクラスタヘッドに立候補することを決定する。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \left(r \bmod \frac{1}{P} \right)}, & \text{if } n \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 P はクラスタヘッドに立候補する確率、 r は現在のラウンド数、 G は過去のラウンドでクラスタヘッドになっていないセンサノードの集合を表す。

立候補したセンサノードはクラスタヘッド立候補メッセージをブロードキャストする。このブロードキャストの通信方式はCSMA/CAが用いられる。

クラスタヘッドではないセンサノードは全てのクラスタヘッド立候補メッセージを受信する前に状態をアクティブにして待機する。クラスタヘッド立候補メッセージを受け取ったセンサノードは、その受信電波強度から送信距離が最も短くなるクラスタヘッドを選択し、CAMA/CAを用いてクラスタ参加要求メッセージを送信する。クラスタヘッドは、この参加要求メッセージを受信し終わるまで状態をアクティブにして待機する。

クラスタ参加要求メッセージを受信し終えたクラスタヘッドは、シンクノードにデータ送信を行うためのTDMA (Time Division Multiple Access) スケジュールを作成する。その後、クラスタ内の全てのセンサノードに対して作成したTDMAスケジュールをブロードキャストする。なお、TDMAスケジュールでは、通信を行う時間がタイムスロットと呼ばれる時間区間に等分割され、クラスタ内の各センサノードに1つのタイムスロットが割り当てられる。この割り当てられたタイムスロットを利用してデータ送信を行うことにより、データ送信時の衝突を防ぐことが可能となる。

・データ送信フェーズ

TDMAスケジュールが全てのセンサノードに通知されると、センサノードはTDMAスケジュールに従って、データをクラスタヘッドへ送信する。クラスタヘッドは全てのセンサノードからデータを受信した後に、シンクノードへデータを送信する。送信が完了したら、次のラウンドのクラスタヘッド立候補フェーズへ移行する。

図1にLEACHによるクラスタリングの例を示す。クラスタ形成フェーズでクラスタヘッドが選出され、各センサノードは最も距離の近いクラスタヘッドに参加要求を行い、クラスタが形成される。データ送信フェーズで、センサノードはデータをクラスタヘッドへ送信し、クラスタヘッドは全てのセンサノードから収集したデータをシンクノードへ送信する。

2.2 HEED

HEEDは、センサノードからクラスタヘッドまでの距離に加えて、センサノードの残存電力も考慮したクラスタリング手法である。各センサノードが

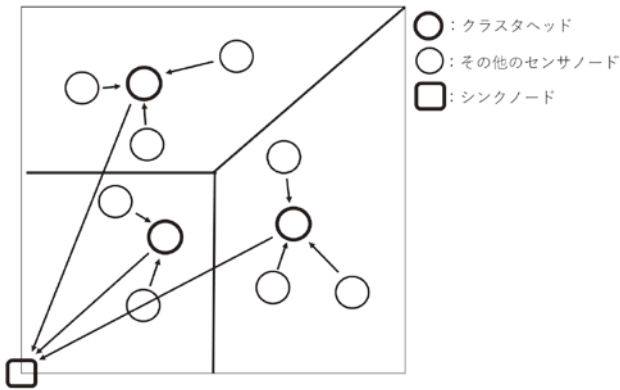


図1 クラスタリングの例

クラスタヘッドに立候補する確率を、初期電力 E_{max} に対する残存電力 $E_{residual}$ の割合に比例させることにより、残存電力の大きいセンサノードを立候補しやすくしている。また、クラスタヘッドの状態を、暫定クラスタヘッド $final_CH$ と最終クラスタヘッド $tentative_CH$ の2種類を用いて表現する。 $final_CH$ を知らせるメッセージをブロードキャストしたセンサノードはそのラウンドではクラスタヘッドとなる。 $tentative_CH$ を知らせるメッセージをブロードキャストしたセンサノードは、自身よりも通信コストを小さくするセンサノードからのクラスタヘッド立候補メッセージを受信した場合に、自身のクラスタヘッドの立候補を破棄して他のクラスタに属することができる。通信コストに関しては、文献[5]において、3種類のコストが提案されている。本論文では、3種類のコストのうち、クラスタの大きさを一定にすることを目的としたノード次数を用いる。したがって、センサノードの通信コストはそのセンサノードのノード次数と同じ値となる。

HEEDは、LEACHと同様、大きくクラスタ形成フェーズとデータ送信フェーズの2つのフェーズから構成される。以下では、HEEDのアルゴリズムについて述べる。

・クラスタ形成フェーズ

センサノードは、次式(2)に示す確率 CH_{prob} に従ってクラスタヘッドに立候補することを決定する。

$$CH_{prob} = \max \left(C_{prob} * \frac{E_{residual}}{E_{max}}, p_{min} \right) \quad (2)$$

ここで、 C_{prob} はクラスタヘッドに立候補する確率、 $E_{residual}$ はセンサノードの残存電力、 E_{max} はセンサノードの初期電力、 p_{min} は CH_{prob} の最小値を表す。

立候補したセンサノードはクラスタヘッド立候補メッセージをブロードキャストする。以下では、ブロードキャスト後の処理について述べる。

STEP 1) 自身のものも含め、クラスタヘッド立候補メッセージを受信した場合

STEP 1-1) 通信コストが最小となるセンサノードをクラスタヘッドに選択する。本論文では、通信コストとしてノード次数を用いるため、ノード次数が最小となるセンサノードがクラスタヘッドとして選択される。

STEP 1-2) クラスタヘッドとして選択したセンサノードが自身の場合

- ・ CH_{prob} が1のとき、最終クラスタヘッドとなり、 $final_CH$ を知らせるメッセージをブロードキャストする。

- ・ CH_{prob} が1未満のとき、暫定クラスタヘッドとなり、 $tentative_CH$ を知らせるメッセージをブロードキャストする。

STEP 2) クラスタヘッド立候補メッセージを受信していない場合

STEP 2-1) CH_{prob} が1のとき、最終クラスタヘッドとなり、 $final_CH$ を知らせるメッセージをブロードキャストする。

STEP 2-2) CH_{prob} が1未満のとき、 $[0, 1]$ の乱数が CH_{prob} より小さい場合、暫定クラスタヘッドとなり、 $tentative_CH$ を知らせるメッセージをブロードキャストする。

STEP 3) CH_{prob} が1のとき、繰り返しを終了する。

STEP 4) CH_{prob} が1未満のとき、 CH_{prob} を $\min(CH_{prob} * 2, 1)$ に設定し、STEP 1) に戻る。

上記の処理の完了後、最終クラスタヘッドとして選択されなかった場合 ($final_CH$ を知らせるメッセージをブロードキャストしなかった場合)、クラスタヘッド立候補メッセージを受信したセンサノードの中から通信コストが最小となるセンサノードを選択し、参加要求メッセージを送信する。また、クラスタヘッド立候補メッセージを受信しなかった場合は、自身が最終クラスタヘッドとなり、 $final_CH$

を知らせるメッセージをブロードキャストする.

・データ送信フェーズ

センサノードは、データをクラスタヘッドへ送信する。クラスタヘッドは全てのセンサノードからデータを受信した後に、シンクノードへデータを送信する。送信が完了したら、次のラウンドのクラスタヘッド立候補フェーズへ移行する。

2.3 LEACHとHEEDの問題点

2.1で述べたように、LEACHは全てのセンサノードが同じ割合でクラスタヘッドに選出されることで、残存電力を平滑化している。しかしながら、クラスタヘッドに選出されたセンサノードがシンクノードから離れている場合、データ送信時により多くの消費電力が必要となる。加えて、クラスタ内においても、センサノードからクラスタヘッドへの距離もセンサノード毎に異なるため、必要となる消費電力が異なる。また、クラスタヘッドへの立候補が確率に依存しているため、クラスタヘッドに立候補しないラウンドが発生する可能性がある。これらが要因となり、各センサノードの残存電力に偏りが生じ、早めに残存電力が枯渇するセンサノードが発生する可能性が高くなる。

一方、HEEDでは、2.2で述べたように、クラスタヘッドへの立候補確率にセンサノードの残存電力を考慮した確率を用いている。これにより、残存電力の大きいセンサノードほどクラスタヘッドに立候補しやすくなり、LEACHと比較して、残存電力をより平滑化することが可能となる。しかしながら、LEACHより低い確率ではあるが、残存電力の少ないセンサノードがクラスタヘッドに選出される可能性があり、もし残存電力の少ないセンサノードがクラスタヘッドに選出された場合、データ送受信中に残存電力が枯渇する可能性が高くなる。また、クラスタ形成フェーズにおいて、通信範囲内に残存電力の多い複数の暫定クラスタヘッドが存在した場合、1つの暫定クラスタヘッドのみが最終クラスタヘッドとして選出され、他の暫定クラスタヘッドはクラスタヘッド立候補を破棄する。そのため、最終クラスタヘッドに選出されなかった残存電力が多いセンサノードを有効利用できない。

3. 提案方式

3.1 アプローチ

本節では、2.3で述べたHEEDの問題を解決するためのアプローチについて述べる。提案方式では下記に示す2つの基本方針に従う。

3.1.1 基本方針1

2.3で述べたように、HEEDの1つ目の問題として、残存電力の少ないセンサノードがクラスタヘッドに選出された場合、データ送受信中に残存電力が枯渇する可能性が高くなるという問題がある。これに対しては、残存電力の少ないセンサノードがクラスタヘッドに選出されないように、初期電力に対する残存電力の割合が一定以下のセンサノードをクラスタヘッドに選出されないように制御する。

3.1.2 基本方針2

2.3で述べたように、HEEDの2つ目の問題として、通信範囲内に残存電力の多い暫定クラスタヘッドが複数存在した場合、必ず1つの暫定クラスタヘッドのみが最終クラスタヘッドとして選出されるため、他の残存電力が多いセンサノードを有効利用できないという問題がある。これに対しては、クラスタヘッド立候補メッセージを受信した場合、通信コストが最小となるセンサノード以外でも残存電力が多ければ、最終クラスタヘッドとして選出される可能性を保持するように制御する。

3.2 提案方式の手順

提案方式は、LEACH、HEEDと同様、クラスタ形成フェーズとデータ送信フェーズの2つのフェーズから構成される。以下では、3.1で述べた基本方針1と2に基づいた提案方式の手順について述べる。

・クラスタ形成フェーズ

センサノードは、自身の初期電力 E_{max} に対する残存電力 $E_{residual}$ の割合 $E_{residual}/E_{max}$ (以降、 $E_{residual}/E_{max}$ を“残存電力比”と呼ぶ)がパラメータ α 以下なら、残存電力が枯渇する可能性があると判断し、クラスタヘッドに立候補しない(3.1.1の基本方針1に該当する)。逆に、残存電力比 $E_{residual}/E_{max}$ がパラメータ α より大きいなら、HEEDと同様、式(2)に示す確率 CH_{prob} に従ってクラスタヘッドに立候補することを決定する。立候補したセンサノード

はクラスタヘッド立候補メッセージをブロードキャストする。以下では、ブロードキャスト後の処理について述べる。

STEP 1) 自身のものも含め、クラスタヘッド立候補メッセージを受信した場合

STEP 1-1) クラスタヘッドに立候補しているセンサノードの中から通信コストが最小となるセンサノードをクラスタヘッドに選択する。2.2で述べたように、本論文では、通信コストとしてノード次数を用いるため、ノード次数が最小となるセンサノードがクラスタヘッドとして選択される。

STEP 1-2) クラスタヘッドとして選択したセンサノードが自身の場合

- ・ CH_{prob} が 1 のとき、最終クラスタヘッドとなり、final_CHを知らせるメッセージをブロードキャストする。
- ・ CH_{prob} が 1 未満のとき、暫定クラスタヘッドとなり、tentative_CHを知らせるメッセージをブロードキャストする。

STEP 1-3) クラスタヘッドとして選択したセンサノードが自身でない場合

クラスタヘッドに立候補している全てのセンサノード n の初期電力に対する残存電力の割合 $E_{residual}^n/E_{max}^n$ を次式 (3) より求める。以降、 $E_{residual}^n/E_{max}^n$ を R_n と表記し、ノード n の“残存電力比”と呼ぶ。

$$\frac{E_{residual}^n}{E_{max}^n} \leftarrow \begin{cases} \frac{E_{residual}^n}{E_{max}^n} \times \frac{D_{max} \times \beta}{D_{i,n}}, & \text{if } \beta \times D_{max} < D_{i,n} \\ \frac{E_{residual}^n}{E_{max}^n}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 D_{max} はクラスタヘッド立候補メッセージの最大到達距離、 $D_{i,n}$ はノード i からノード n の距離、 β はシステムパラメータを表す。

自身のセンサノードの残存電力比が、クラスタヘッドに立候補している全てのセンサノード n の初期電力に対する残存電力比より大きい場合、残存電力が多いセンサノードを有効利用するために、暫定クラスタヘッドとし、tentative_CHを知らせるメッセージをブロードキャストする (3.1.2の基本方針2に該当する)。

STEP 2) クラスタヘッド立候補メッセージを受信していない場合

STEP 2-1) CH_{prob} が 1 のとき、最終クラスタヘッドとなり、final_CHを知らせるメッセージをブロードキャストする。

STEP 2-2) CH_{prob} が 1 未満のとき、[0, 1] の乱数が CH_{prob} より小さい場合、暫定クラスタヘッドとなり、tentative_CHを知らせるメッセージをブロードキャストする。

STEP 3) CH_{prob} が 1 のとき、繰り返しを終了する。

STEP 4) CH_{prob} が 1 未満のとき、 CH_{prob} を $\min(CH_{prob} * 2, 1)$ に設定し、STEP 1) に戻る。

上記の処理の完了後は、2.2で述べたHEEDと同様の処理を行う。

・データ送信フェーズ

データ送信フェーズに関しても、2.2で述べたHEEDと同様の処理を行う。

3.3 提案方式の例

本章では、理解のために3.2で述べた提案方式の例を示す。図2に示すトポロジ例について考える。図2では、 D_{max} を300 (m)、パラメータ α を0.3、パラメータ β を0.167 (1/6)、ノード 1, 2, 3 の通信コストをそれぞれ 2, 3, 3、 C_{prob} を0.05 (5%) と想定する。また、クラスタ形成フェーズにおいて、式 (2) に従ってノード 1, 2, 3 がクラスタヘッドに立候補した場合を考える。ここで、提案方式ではクラスタヘッドの立候補の前に、残存電力比に関する判定があるが、ノード 1, 2, 3 の残存電力比 (ノード 1 が0.8、ノード 2 が0.5、ノード 3 が0.6)

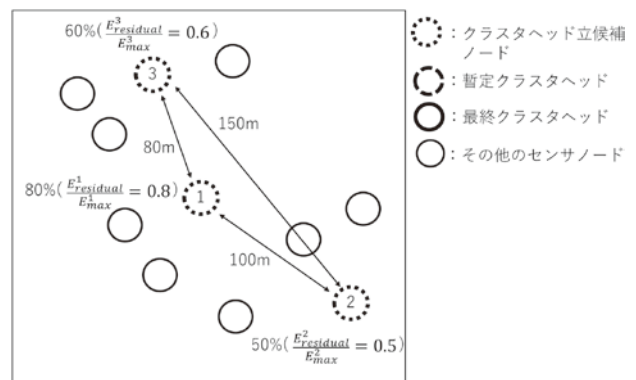


図2 トポロジ例 (クラスタ立候補後)

はいずれも0.3以上なので、クラスタヘッドの立候補が可能であり、この例では、ノード1, 2, 3が立候補している。

最初に、ノード1に着目する。ノード1はクラスタヘッドに立候補し、通信コストがノード2とノード3より小さく、 CH_{prob} (0.05) が1未満なので、ノード1は暫定クラスタヘッドとなる (STEP 1-1とSTEP 1-2)。次に、ノード2に着目する。ノード2はクラスタヘッドに立候補しているが、通信コストがノード1より大きいので、STEP 1-3の処理を行う。STEP 1-3の式 (3) より、ノード1の残存電力比 R_1 は0.4 ($0.8 \times 50/100$)、ノード2の残存電力比 R_2 は0.5、ノード3の残存電力比 R_3 は0.2 ($0.6 \times 50/150$) となる。ノード2が最も大きいので、ノード2は暫定クラスタヘッドとなる。次に、ノード3に着目する。ノード3はクラスタヘッドに立候補しているが、通信コストがノード1より大きいので、STEP 1-3の処理を行う。STEP 1-3の式 (3) より、ノード1の残存電力比 R_1 は0.5 ($0.8 \times 50/80$)、ノード2の残存電力比 R_2 は0.167 ($0.5 \times 50/150$)、ノード3の残存電力比 R_3 は0.6となる。ノード3が最も大きいので、ノード3は暫定クラスタヘッドとなる。

上記の処理の終了後のトポロジ例を図3に示す。図3に示すように、ノード1, 2, 3の全てが暫定クラスタヘッドとなる。以降、STEP 4により、 CH_{prob} が増加し、最終的に1になると、STEP 3により終了となる。クラスタ形成フェーズ (繰り返し処理) 終了後のトポロジ例を図4に示す。図4に示すように、ノード1, 2, 3の全てが最終クラスタヘッドとなる。また、他のノード (最終クラスタヘッドでないノード) は距離の近いクラスタヘッドに

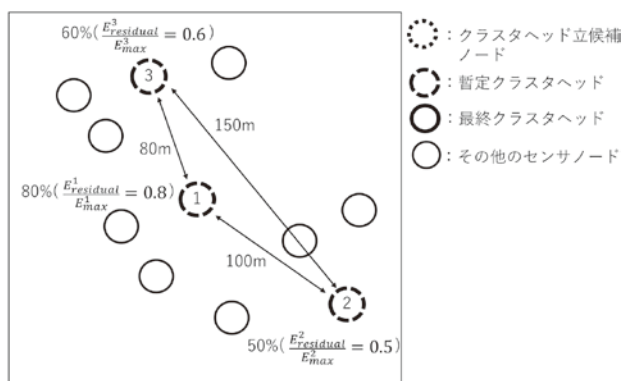


図3 トポロジ例 (STEP 2終了後)

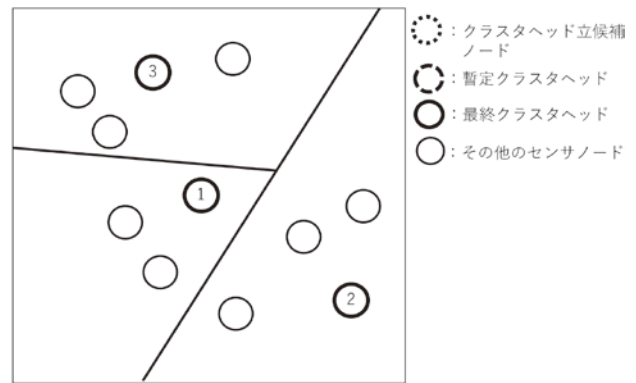


図4 トポロジ例 (クラスタ形成フェーズ後)

参加することになり、3つのクラスタ構成となる。

その後、データ送信フェーズで、各クラスタヘッドはクラスタ内の全てのセンサノードからデータを受信した後に、シンクノードへデータを送信する。

次に、比較のために2.2で述べたHEEDの例を簡単に示す。図2に示した例と同じトポロジについて考える。HEEDでは、提案方式と同様、ノード1, 2, 3の通信コストをそれぞれ2, 3, 3, C_{prob} を0.05 (5%) と想定する。なお、HEEDでは、 D_{max} , パラメータ α , パラメータ β を使用しない。

提案方式と同様、最初に、ノード1に着目する。ノード1はクラスタヘッドに立候補し、通信コストがノード2とノード3より小さく、 CH_{prob} (0.05) が1未満なので、ノード1は暫定クラスタヘッドとなる (STEP 1-1とSTEP 1-2)。次に、ノード2とノード3に着目する。ノード2とノード3はクラスタヘッドに立候補しているが、両ノードとも通信コストがノード1より大きいので、クラスタヘッドの立候補を破棄して、通常のセンサノードとなる。

クラスタ形成フェーズ (繰り返し処理) 終了後のトポロジ例を図5に示す。図5に示すように、ノード

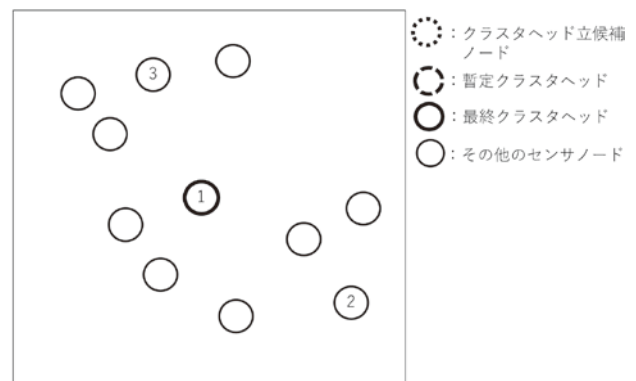


図5 HEEDのトポロジ例 (クラスタ形成フェーズ後)

ド1のみが最終クラスタヘッドとなるため、1つのクラスタ構成となる。その後、データ送信フェーズで、ノード1のみが全てのセンサノードからデータを受信した後に、シンクノードへデータを送信するため、ノード1の残存電力の枯渇が起きる可能性が高くなる。

4. 評価実験

本章では、提案方式の評価実験結果について述べる。本実験では、ネットワークの長寿命化の観点から、提案方式と従来方式 (LEACH, HEED) を比較し、評価する。LEACHに関しては、マサチューセッツ工科大学のuAMPSプロジェクト[10]によりNS2に実装されたLEACHを用いる。提案方式とHEEDに関しては、LEACHを基にNS2に実装したものを用いる。本実験のシミュレーション条件を表1に示す。また、送受信における電力消費モデルに関しては文献[4]と同じモデルと設定を用いる。文献[4]では、 k (bits) のデータを距離 d (m) 離れたセンサノードに送信する時の消費電力 $E_{Tx}(k,d)$ 、 k (bits) のデータを受信する時の消費電力 $E_{Rx}(k)$ は次式 (4) と (5) で与えられる。

$$E_{Tx}(k,d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (4)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (5)$$

ここで、 E_{elec} は1 (bit) のデータを送受信する時の消費電力、 ϵ_{amp} は1 (bit) のデータを1 (m) 離れたセンサノードに送信する時の消費電力である。本実験では、文献[4]に従い、 E_{elec} は50 (nJ/bit)、 ϵ_{amp} は100 (pJ/bit/m²) に設定する。

表1の確率P (LEACH) の設定に関しては、文献[10]と[11]では0.05が推奨されているため、0.05を用いる。確率 C_{prob} (提案方式, HEED) に関しても、確率P (LEACH) と同様に0.05を用いる。また、式(2)に示すように、実際のクラスタの立候補の確率 CH_{prob} は、確率 C_{prob} に残存電力比 ($E_{residual}/E_{max} \leq 1$) を掛け合わせているため、確率 C_{prob} に0.05を設定した場合、実際のクラスタの立候補の確率 CH_{prob} は、0.05より小さい値となる。そのため、確率P (LEACH) と確率 C_{prob} (提案方式, HEED) の設定に0.03も加えることとする。

表1 シミュレーション条件

ノード数	100
電波伝搬モデル	自由空間モデル
観測フィールド	100×100 (m ²)
初期電力	2 (J)
センサノードの座標	ランダム
シンクノードの座標	(0, 0)
確率P (LEACH)	0.05, 0.03
確率 C_{prob} (提案方式, HEED)	0.05, 0.03
パラメータ α (提案方式)	0.1, 0.3, 0.5
パラメータ β (提案方式)	0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65
試行回数	100

LEACHの確率Pを0.05、提案方式とHEEDの確率 C_{prob} を0.05 (パラメータ α は0.3, パラメータ β は0.25) に設定し、時間経過に伴うセンサノードの生存数を図6に示す。また、LEACHの確率Pを0.03、提案方式とHEEDの確率 C_{prob} を0.03 (パラメータ α は0.3, パラメータ β は0.25) に設定した場合のセンサノードの生存数を図7に示す。図6と図7のx軸は時間であり、y軸はその時間までのセンサノード (残存電力が0より大きいセンサノード) の生存数である。

図6より、センサノードの生存数の最も早く減少し始めるのがHEEDであり、その次が提案方式、最も遅く減少し始めるのがLEACHとなっている。その後、LEACHは減少が始まると急激にセンサノードの生存数が減少する。一方、提案方式は、減少が始まってもセンサノードの生存数がなだらかに減少するため、300 (s) 付近以降は、LEACHより生存数が多い結果となっている。HEEDは減少が始まってからもセンサノードの生存数がなだらかに減少し、620 (s) 付近以降は提案方式より、生存数が多くなっている。しかし、620 (s) 付近以降では、生存数自体が20程度 (全体のセンサノードの20%程度) と少ない状態であり、少ないセンサノードでセンシングを行う状況となる。ネットワーク寿命に対する要求はアプリケーションによって異なるため、文献[7]では、ネットワーク寿命の評価指標として、センサノードの生存数が減少し始める時間 (FND: First Node Death)、センサノードの生存数が0になる時間 (LND: Last Node Death)、全体の半分

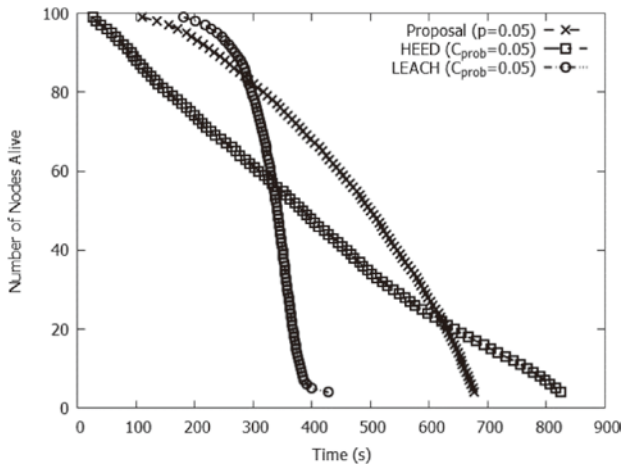


図6 時間経過に伴うセンサノードの生存数 (P=0.05, $C_{prob}=0.05$)

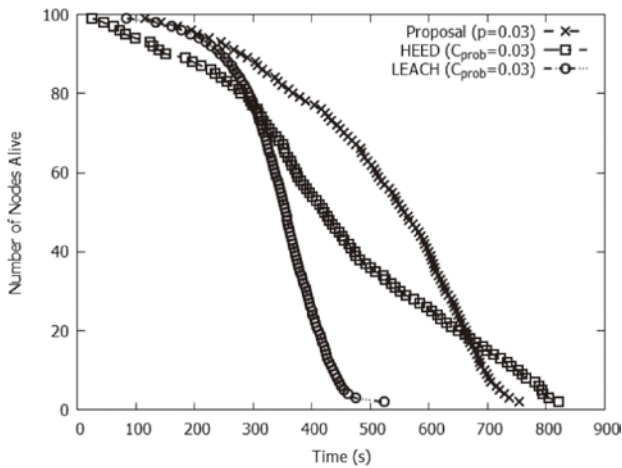


図7 時間経過に伴うセンサノードの生存数 (P=0.03, $C_{prob}=0.03$)

のセンサノードが生存している時間 (HNA : Half Nodes Alive) の3つを用いて評価を行っている。図6では、FNDに関してはLEACH, HNAに関しては提案方式, LNDに関してはHEEDが最もよい性能を示している。図7では、提案方式はLEACHより、センサノードの生存数が常に多くなっている。HEEDは、図6と同様に、680 (s) 付近以降は提案方式より生存数が多くなっているが、生存数自体が20程度 (全体のセンサノードの20%程度) と少ない状態であり、少ないセンサノードでセンシングを行う状況となる。FNDとHNAに関しては提案方式, LNDに関してはHEEDが最もよい性能を示している。特にHNDに関しては、提案方式はHEEDと比較して30%程の差があり、高い有効性が認められる。また、LNDに関しては、提案方式はHEEDよ

り短い時間となっているが、その差は8%程となっている。上述より、ネットワークの長寿命化の観点から、提案方式が従来方式 (LEACH, HEED) と比較して、高い有効性が認められる。また、提案方式とHEEDに関しては、確率 C_{prob} の設定が0.03の方が、0.05より時間経過に伴う生存数が多い。

次に、提案方式におけるパラメータ α と β のネットワーク寿命への影響を評価する。図8は、確率 C_{prob} を0.05 (パラメータ β は0.25) に設定し、パラメータ α を0.1から0.5まで変化させた場合のセンサノードの生存数を示している。図9は、確率 C_{prob} を0.05 (パラメータ α は0.3) に設定し、パラメータ β を0.25から0.65まで変化させた場合のセンサノードの生存数を示している。

パラメータ α に関しては、図8より、0.3の場合

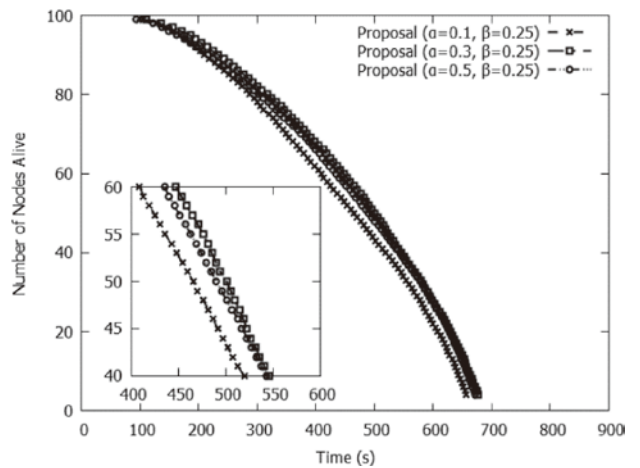


図8 提案方式のセンサノードの生存数 ($\alpha=0.1\sim 0.5$)

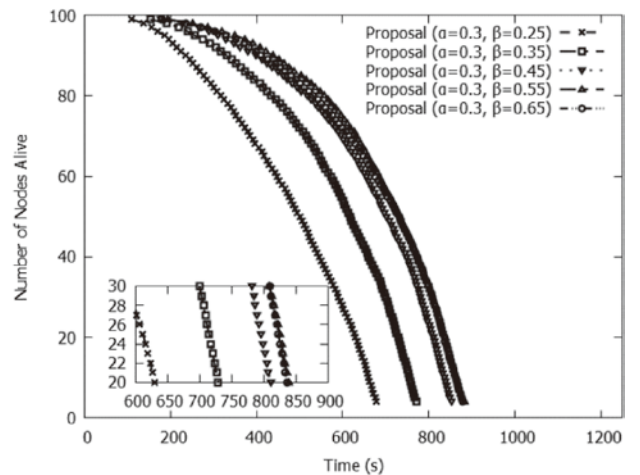


図9 提案方式のセンサノードの生存数 ($\beta=0.25\sim 0.65$)

が、時間経過に伴うセンサノードの生存数が最も多くなっている。したがって、本実験の条件では、パラメータ α を0.3に近い値で設定することが望ましい。この結果は、各センサノードは自身の残存電力が初期電力の30%に達した時点で、自身ではクラスタヘッドにならずに、他のクラスタヘッドにデータを送信するか、あるいは自身でシンクノードにデータを送信した方がよいことを意味する。次に、パラメータ β の最適値を概算する。本実験では、クラスタヘッドに選出された場合の1ラウンド当たりの消費電力は約0.62 (J) となった。この結果より、クラスタヘッドに選出された時点で、初期電力の0.31倍 ($\approx 0.62 \div 2$) 以上の残存電力がないとすぐに消費電力が枯渇することになる。この概算値は、本実験で得られた0.3に近い値となったが、厳密な最適値算出のためには理論的な解析が必要となる。図9より、パラメータ β が0.25から大きくなるにつれて生存数が多くなり、0.55の場合が最も多くなっている。0.65の場合は0.55の場合より少なくなっている。したがって、本実験の条件では、パラメータ β を0.55に近い値で設定することが望ましい。次に、パラメータ β の最適値を概算する。観測フィールドが 100×100 (m²) なので、観測フィールドの中央と四隅にクラスタヘッドがあるとすると (C_{prob} が0.05なので、クラスタヘッドが5個存在すると仮定する) と、クラスタヘッド間の最短距離はおおよそ70 (m) となる。フィールド内のクラスタヘッド立候補メッセージの最大到達距離 D_{max} はおおよそ140 (m) であること (本実験ではランダムに配置するので、最大到達距離は140 (m) ($\approx 100 \times \sqrt{2}$) よりわずかに小さい値となる可能性が高い) から、 $\beta = 70$ (m) $\div 140$ (m) = 0.5となる。この概算値は、本実験で得られた0.55に近い値ではあるが、パラメータ α と同様に、厳密な最適値算出のためには理論的な解析が必要となる。

上述より、ネットワークの長寿命化の観点から、提案方式の本実験における各種パラメータの推奨値が特定できたが、これらの推奨値はシミュレーション条件により異なると予想される。そのため、厳密な最適値算出のためには、理論的な解析が必要である。

5. おわりに

本論文では、無線センサネットワークにおけるネットワークの長寿命化を目的としたクラスタリング手法を提案した。提案方式は、残存電力が一定以下のセンサノードがクラスタヘッドに選出されないように制御し、更に、残存電力が多い複数のセンサノード同士が通信範囲内に存在していた場合でもこれらのセンサノードがクラスタヘッドに選出されるように制御するクラスタリング手法である。

評価実験では、従来方式 (LEACH, HEED) と比較し、ネットワークの長寿命化の観点からの有効性を示した。LEACHと比較して、時間経過に伴うセンサノードの生存数が常に多く、HEEDと比較して、生存数自体が少ない状態を除き、時間経過に伴うセンサノードの生存数が多いという結果が得られた。

今後の課題として、提案方式では従来方式より2つのパラメータが追加されているため、それらのパラメータの最適値算出のための理論的な解析を行う必要がある。加えて、グリッド型またはチェーン型のクラスタリング手法を加えた比較も実施する予定である。

【引用文献】

- [1] 戸辺義人：無線センサネットワークの技術動向，電子情報通信学会論文誌 (B)，Vol.J90-B, No.8, pp.711-719 (2007).
- [2] 大橋正良，大槻知明：ユビキタスセンサーネットワーク，電子情報通信学会誌，Vol.95, No.9, pp.772-778 (2012).
- [3] 阪田史郎：M2Mアドホックネットワーク，センサネットワークの今後の展開，電子情報通信学会信学技報，Vol.113, No.295, CS2013-47, pp.39-44 (2013).
- [4] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, in *Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp.1-10 (2000).
- [5] Younis, O. and Fahmy, S.: HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.3, No.4, pp.366-379 (2004).
- [6] Singh, S. and Sharma, S.: A Survey on Cluster Based Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, in *Proc. of International Conference on Advanced Computing*

- Technologies and Applications*, Vol.45, pp.687-695 (2015).
- [7] Batra, P. K. and Kant, K.: LEACH-MAC: A new cluster head selection algorithm for wireless sensor networks, *Wireless Networks*, Vol.22, No.1, pp.49-60 (2016).
- [8] Buttyan, L. and Schaffer, P.: PANEL: Position-based Aggregator Node Election in Wireless Sensor Networks, in *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems Conference*, pp.1-9, (2007).
- [9] Lindsey, S., Raghavendra, C. and Sivalingam, K.: Data Gathering Algorithms in Sensor Networks using Energy Metrics, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol.13, No.9, pp.924-935 (2002).
- [10] MIT μ AMPS (μ -Adaptive Multi-domain Power aware Sensors) project, available from <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/> (accessed 2018-05-14).
- [11] Yang, H. and Sikdar, B.: Optimal Cluster Head Selection in the LEACH Architecture, in *Proc. of IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, pp.93-100 (2007).