

センサネットワークのための近傍ノード数に基づく 省電力クラスタリング通信

森下 宏樹^{†1} 重井 徳貴^{†1} 宮島 廣美^{†1}

無線センサネットワークにおいてエネルギー効率の良い通信手法として、クラスタリングに基づく通信が考えられている。この手法では、センサノードがクラスタを形成し、各クラスタにおいて、その代表ノードがクラスタ内の情報を収集し、圧縮したデータを遠方にある基地局に送ることで省電力を実現する。本稿では、この枠組みにおいて、各ノードが自身の近傍に位置するノード数を把握し、自律的にクラスタを形成し、通信を行う手法を提案する。本手法は、従来法に比べ少ない通信で近傍ノード数を把握し、そして、近傍ノード数に基づき、ブロードキャストの範囲を決めるため、クラスタのメンバ数を均一化でき、電力消費を小さくできる。さらに、マルチホップ通信に拡張した手法も提案する。シミュレーションにより、従来法より優れることを示す。

Power-saving Clustering Communication Based on Number of Neighbor Nodes for Sensor Networks

HIROKI MORISHITA,^{†1} NORITAKA SHIGEI^{†1}
and HIROMI MIYAJIMA^{†1}

In order to prolong observation using wireless sensor network (WSN), a communication framework based on clustering has been studied. In the framework, sensor nodes form clusters, each of which has a representative node. Each representative node collects and compresses information data within its cluster and sends the compressed one to the base station, usually far away. In this paper, we propose communication methods in which nodes autonomously form clusters by grasping the number of neighboring nodes. The features of our methods are: 1) the number of neighboring nodes is grasped with less communication and 2) the radius of broadcast is determined based on the number of neighboring nodes. Thanks to those features, each cluster has almost even members and their energy consumption is smaller than conventional methods. We also propose two types of multi-hop version for the proposed method. Simulation results show that our proposed methods are superior than conventional methods.

1. はじめに

ワイヤレスセンサネットワーク (WSN) はユビキタス社会を実現するための重要な技術として期待されている。WSN は、数百から数千のセンサノードから構成され、それぞれが温度や気圧などの観測領域の環境状況を観測し、そのデータを基地局に送信することでユーザは環境情報を取得することができる。センサノードは一般的にバッテリーで動作し、バッテリーの交換が困難であること、稼働中、無線通信におけるエネルギー消費が最も大きいことを考慮すると、長期間の観測を実現するためには、エネルギー効率のよい通信ネットワークを構築する必要がある。データの送信に必要なエネルギーは、通信距離の2乗か4乗に比例するため、各センサノードが直接基地局にデータを送信するとエネルギー消費が大きくなる。そこで、近距離のセンサノード同士がクラスタを形成し、その代表ノードである、クラスタヘッドがクラスタ内のデータを収集・圧縮し、基地局に送信するクラスタリング通信の枠組みが考えられている⁷⁾。

このクラスタリングを用いた手法として、これまでに LEACH, HEED, ACE, ANTCLUST などの手法が提案されている^{1)-4),6)}。LEACH は、各ノードが均等にクラスタヘッドになることで、ノード間のエネルギー消費の均一化を図っている¹⁾。しかし、エネルギー残量を考慮しておらず、クラスタヘッドの決定は各ノードが独立に行うため、エネルギー消費の均一化は十分ではない。これに対し、HEED, ACE, ANTCLUST などの手法では、エネルギー残量やノード間の距離を考慮することで、エネルギー消費の均一化やネットワークの更なる長寿命化を図っている^{2)-4),6)}。また著者らは、6) で近傍ノード数を考慮することで効果的なクラスタリングを実現できることを示した。しかし、これらの手法ではクラスタ形成のために多くのブロードキャストを必要とし、そのエネルギー消費が大きくなっている。

本稿では、自律的に自身の近傍に位置するノードの数を把握し、加えて自身のエネルギー残量を考慮してクラスタリングを行う手法を提案する。本手法の特徴は、近傍ノード数に基づきブロードキャストの範囲を決めるため、クラスタのメンバノード数を均一化できること、各ノードの停止情報を送信することによって近傍ノード数を管理するため、従来法に比べてブロードキャストによる消費電力が少ないことである。また、基地局へデータを送信

^{†1} 鹿児島大学 大学院理工学研究科 電気電子工学専攻

Electrical and Electronics Engineering Course, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

する際に、経路ノードを利用して送信するマルチホップ通信に拡張した手法も提案する。シミュレーションにより、LEACH, ANTCLUST との比較を行い、これらの従来法より優れている事を示す。

2. 無線センサネットワーク

この節では、本稿で仮定する無線センサネットワーク (WSN) のモデルについて説明する²⁾。仮定するモデルは N 個のセンサノードと 1 個の基地局ノードから構成される。

すべてのセンサノードは以下の機能と特徴を有する。

- (1) 温度、気圧、照度などの環境情報を測定できる。
- (2) 消費電力が低いマイコンを有し、データ処理ができる。
- (3) 無線通信機能を有し、送信電力を制御することによって、任意のノードや基地局と通信を行うことができる。
- (4) 容量が有限のバッテリーにより動作する。
- (5) 各ノードは受信電波強度などを用いて、他のノードとの距離を知っているものとする。
- (6) センサノードの時刻は、クロック同期の手法⁸⁾によりノード間で同期がとれているものとする。

基地局ノードは、十分な処理能力と記憶容量を有し、利用できる電力は制限されないものとする。

センサノードの無線モデルは、2) と同様のものを用いる。 k ビットのメッセージを距離 d だけ伝送するのに使用するエネルギーは、

$$E_T(k, d) = \begin{cases} k \cdot (E_{elec} + \epsilon_{fs} \cdot d^2) & (d < d_0) \\ k \cdot (E_{elec} + \epsilon_{mp} \cdot d^4) & (d > d_0) \end{cases} \quad (1)$$

であり、このメッセージを受け取るために必要になるエネルギーは

$$E_R(k) = E_{elec} \cdot k \quad (2)$$

とする。ここで、 d_0 は環境に依存する距離の定数である。

またノード (センサ端末) A からノード B へ送信するのに必要なエネルギーとノード B からノード A へ送信するのに必要なエネルギーは同じである対称的なものとする。

全てのノードは複数の観測データを一つの観測データに圧縮できる能力を持っているとし、その際に消費するエネルギーは、以下の式で与える。

$$E_F(k) = E_{fusion} \cdot k \quad (3)$$

3. 消費エネルギー低減のためのクラスタリング手法

WSN の消費電力低減のために、クラスタリングを用いたセンサノードからの情報収集の枠組みが考えられている¹⁾。このクラスタリング手法では、 N 個のセンサノードがクラスタに分割され、各クラスタはクラスタヘッドと呼ばれる代表ノードを 1 つ持つ。クラスタヘッドでない各ノードは、観測データを基地局に送信するかわりに、自身が属するクラスタ内のクラスタヘッドに送信する。その後、各クラスタヘッドは、受信したデータを処理し、小さいデータサイズへと圧縮する。この枠組みは次の特徴を持つ。

- (1) 非クラスタヘッドノードは長距離通信を避ける事ができ、エネルギー消費を抑えることができる。
- (2) 基地局に送るデータ量を少なくすることでエネルギー消費を抑えられる。

クラスタリング手法の動作サイクルの 1 ラウンドは、セットアップと情報収集のフレームからなる。セットアップフレームでは、クラスタリングアルゴリズムにより、クラスタとクラスタヘッドが決定され、各クラスタヘッドはクラスタ内のノードがデータの送信に用いる時分割多重 (TDMA) のスケジュールを作成する。情報収集のフレームでは、各ノードが TDMA スケジュールにしたがい観測データをクラスタヘッドへ送信し、クラスタヘッドは受信データを圧縮し、基地局へ送信する。

クラスタヘッドとクラスタを決定するために、LEACH, HEED, ACE, ANTCLUST などのクラスタリングアルゴリズムが提案されている¹⁾⁻⁴⁾。代表的な手法である LEACH では、クラスタヘッドを自律分散的に決定する¹⁾。各ラウンド l において、各ノード $i \in V(l)$ は独立に以下の確率 $P_i(l)$ でクラスタヘッドになるかどうかを決定する。

$$P_i(l) = \frac{k}{N - k(l \bmod \frac{N}{k})} \quad (4)$$

ここで、 $V(l)$ は最近 $(l \bmod \frac{N}{k})$ ラウンドでクラスタヘッドにならなかったことがないノードの集合、 k は各ラウンドの平均のクラスタヘッド数である。これにより、あるラウンドでクラスタヘッドとなったノードは、他の全ノードがクラスタヘッドを経験するまでの一定期間は再びクラスタヘッドことはなく、ノード間のエネルギー消費の均一化を図っている。そして、クラスタヘッドの決定後、クラスタヘッドはブロードキャストを行い、非クラスタヘッドノードは最も近いクラスタヘッドへの所属を決定する。

ANTCLUST は、エネルギー残量がより大きく、近傍ノードとの距離がより小さいノードをクラスタヘッドとする。そして各ノードは、よりメンバ数の少ないクラスタへ所属す

る。その手順は次の通りである。ラウンドの開始時点で、全てのノードは自らをクラスタヘッドの候補とみなし、エネルギー残量の多いノードがより早い段階で半径 R の範囲に立候補宣言のブロードキャストを行う。これを受信したノードは立候補を取りやめることによって、よりエネルギー残量の多いノードがクラスタヘッドとなる。クラスタヘッドが決定した後、クラスタヘッド以外のノードのうち割合 P_{ex} のノードが、自身が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を行う。この情報を受信したノードは、自身が所属するクラスタの情報と比較を行い、エネルギー残量、自身からの距離などを考慮して、よりエネルギー効率の良いクラスタに所属するようにクラスタを形成する。

4. 提案手法

ANTCLUST などの、ノードのエネルギー残量、ノード間の距離を考慮したクラスタリング手法では、LEACH に比べ、エネルギー消費を低減することができる。ここでは、従来法に比べ、クラスタリングに必要なとされる通信量が少なく近傍ノード数とエネルギー残量を考慮する自律分散的に実行可能なクラスタリング手法を提案する。また、提案法をマルチホップ通信に拡張し、エネルギー消費をさらに低減できる手法を提案する。

4.1 近傍ノード数の把握による自律的クラスタリング通信

本手法では、各ノードが小規模なブロードキャストを行うことにより、各ノードの近傍ノード数を求め、各ノードが近傍ノード数とエネルギー残量を考慮しクラスタヘッドとなるかどうかを判断することでノードが自律的にクラスタリングを行う。

本手法の 1 ラウンドは、前節で述べた手法と同様に、セットアップと情報収集のフレームからなり、情報収集のフレームは同じである。本手法のセットアップフレームは、以下の三つの過程から構成される。

(i) 近傍ノード数の計算過程

ノードがブロードキャストを行うことにより、各ノード i は近傍ノード数 n_i を把握する。

(ii) クラスタヘッド決定過程

近傍ノード数とエネルギー残量に基づきクラスタヘッドを決定する。ここでは、近傍ノード数とエネルギー残量がより大きいノードほど高い確率でクラスタヘッドとなる。

(iii) クラスタ形成過程

クラスタヘッドにならなかったノードが、自身が所属するクラスタを決定し、所属することになったクラスタヘッドに通知する。

以下では、各過程の詳細について述べる。

4.1.1 近傍ノード数の計算過程

この過程では、各ノード i が近傍ノード数 n_i を把握する。把握の方法は、最初のラウンドと 2 回目以降のラウンドで異なる。最初のラウンドでは全ノードがブロードキャストを行うが、2 回目以降のラウンドでは各ノードは高々 1 回のラウンドでのみブロードキャストを行う。これにより、近傍ノード数の把握に要する電力消費を低く抑える。

最初のラウンドでは、まず、全てのノードが、半径 r の範囲に自身のノード ID をブロードキャストする。各ノード i は、受信数をカウントし、これを近傍ノード数 n_i とする。 n_i は、ノード i を中心として、半径 r の範囲内に存在するノードの数となる。

2 回目以降のラウンドでは、エネルギー残量が少なくなり停止を決定したノードのみがブロードキャストを行い、自身が停止することを近傍ノードに通知する。通知を受信した各ノード i は、受信した停止通知の数だけ近傍ノード数 n_i を減じることで、近傍ノード数を正しく保つ。具体的には、停止の判定と通知は次のように行う。各ノード i は自身のエネルギー残量 e_i が、以下の閾値 Θ_i より小さいならば、停止を決定し、半径 r の範囲に停止情報をブロードキャストし、機能を停止させる。

$$\Theta_i = 3 \cdot E_T(\text{DataPacket}, \text{dist}_{i-\text{sink}}) \quad (5)$$

ここで、DataPacket は、情報収集フレームで送信されるデータパケットサイズ、 $\text{dist}_{i-\text{sink}}$ はノード i と基地局間の距離である。停止の閾値として式 (5) を用いることにより、ラウンド中にノードが停止することを防いでいる。

4.1.2 クラスタヘッド決定過程

本過程では、自身をクラスタヘッド候補と考えるノードが、近傍ノード数とエネルギー残量に基づき、次々とクラスタヘッドとなることを決断し、周囲のノードに通知する。他ノードからクラスタヘッドになることの通知を受けたノードは、クラスタヘッドとなることを断念する。すなわち、より高い確率でクラスタヘッドになるためには、より早くクラスタヘッドになることを決断しなければならない。

クラスタヘッドとなるノードは、エネルギー残量がより大きいノードであるべきである。また、ノードがより密集している領域には、より多くのクラスタヘッドを配置するべきであろう。すなわち、クラスタヘッドとなるノードは、近傍ノード数がより多いノードであるべきである。これらのことより、本過程をスタートしてから、各ノードは i は、以下の時刻 τ_i にクラスタヘッドとなることを決断する。

$$\tau_i = \frac{\alpha}{n_i \cdot e_i^4} \quad (6)$$

ここで、 α は適切な定数である。

また、ノード i が、クラスタヘッドとなることを通知すべき範囲 R_i は、近傍ノード数 n_i に依存すると考えられる。今、各クラスタが平均で N_{opt} 個のメンバノードを持つようにしたいとする。ノードが一様に分布する場合、ノード i を中心とする円形の領域では、平均で N_{opt} 個のノードが存在するのは、半径 $r\sqrt{\frac{N_{opt}}{n_i}}$ の範囲である。このことより、クラスタヘッドとなることを決断したノード i がそのことをブロードキャストする範囲を次式で与えることにする。

$$R_i = r\sqrt{\frac{N_{opt}}{n_i}} \quad (7)$$

本過程のアルゴリズムを以下に示す。

Step1:稼働中の各ノード i は、自身の状態 s_i をクラスタヘッド候補とする。現在の時刻 t_0 を記憶する。

Step2:稼働中の各ノード i は、時刻 $t_0 + T_{listen}$ まで、各イベント毎に以下を実行する。

(イベント 1) 時刻 $t_0 + \tau_i$ となった時

もし状態 s_i が「クラスタヘッド候補」ならば、クラスタヘッドとなることを決断し、 s_i を「クラスタヘッド」とし、クラスタヘッドとなることの宣言を R_i の範囲にブロードキャストする。

(イベント 2) 他ノードの宣言を受信した時

ノード j からの宣言を受信したとする。

もしノード i の状態 s_i が「クラスタヘッド候補」ならば、クラスタヘッドとなることを諦め、 s_i を「非クラスタヘッド」とする。そしてさらに、最近接クラスタヘッド c_i に j を記憶し、最近接クラスタヘッドまでの距離 d_i^{min} にノード i, j 間の距離を記憶する。

もしノード i の状態 s_i が「非クラスタヘッド」かつノード i, j 間の距離が d_i^{min} よりも小さいならば、 c_i に j を記憶し、 d_i^{min} にノード i, j 間の距離を記憶する。

□

4.1.3 クラスタ形成過程

クラスタヘッド以外のノード i は、最も近いクラスタヘッド c_i のクラスタに参加するために、ノード i は、クラスタヘッド c_i にクラスタ参加情報を送信する。クラスタヘッドとなった各ノード j は、受け取ったクラスタ参加情報から TDMA スケジュールを作成し、メンバーノードにそのスケジュールを送信する。

4.2 マルチホップ通信への拡張

前節で説明した手法において、クラスタヘッドが基地局に環境情報の送信を行う際に、中継ノードを使用して、マルチホップ通信を行うよう拡張する。前節の過程 (iii) の後に過程 (iv) として、クラスタヘッドの決定と同様の方法により、マルチホップ用の経路ノードとなるノードを決定する。具体的には、以下の式で与えられる値が最大となる、クラスタヘッド以外のノードが経路ノードになることを決断する。

$$\frac{\max_dist}{\text{dist}_{i-sink}} \cdot e_i^4 \quad (8)$$

ここで、 \max_dist はネットワーク内の最大の距離を表す。経路ノードとなることを決断したノードはネットワーク全体に向けて、経路ノードの宣言をブロードキャストする。宣言を受信したクラスタヘッド以外のノードは経路ノードとなることを諦める。ネットワーク全体に宣言を通知することにより、経路ノードとなるノードは各ラウンドにおいて1つのみに限定されることになる。また、宣言を受信したクラスタヘッドは経路ノードとなるノードの NodeID と、経路ノードと基地局の接続コスト C_{link} を保持しておく。

経路ノード決定後、クラスタメンバからの情報を収集したクラスタヘッドは、経路ノードを利用して、基地局に情報を送信する。その際に、クラスタヘッドは保持していた経路ノードと基地局の接続コストと、自身と基地局との接続コストを比較し、経路ノードの接続コストがより大きい場合には、経路ノードを使用せず、直接基地局への送信を行う。この C_{link} は以下の式で与えられる。

$$C_{link}(i, j) = \frac{1}{e_i} \cdot (E_T(i, j) + E_R(i, j)) \quad (9)$$

ここで、 $E_T(i, j)$ はノード i がノード j に送信する際の消費エネルギーであり、 $E_R(i, j)$ は受信する際の消費エネルギーを表す。

4.3 データ圧縮による省電力化

前節の手法では、マルチホップ用の経路ノードは、クラスタヘッドからの情報を受け取る度に、そのまま基地局へ送信していた。この方法だけでは、電力消費を減らすことはできなかった。そこで、ここでは経路ノードがクラスタヘッドからの情報を収集・圧縮することで、省電力化を図る。経路ノードは全てのクラスタヘッドからの情報を受信した後、データの圧縮処理を行う。この際に消費される電力は、クラスタヘッドがクラスタメンバからの情報を圧縮する際の消費電力と同様である。その後圧縮されたデータを基地局へ送信する。この方法を取ることで、経路ノードは複数回の長距離通信を1度行うだけでよく、送信

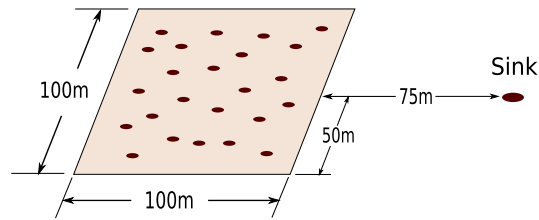


図1 シミュレーションに用いたネットワーク

表1 各種パラメータ

d_0	75m
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{fusion}	5 nJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
Data packet size	800bit
Broadcast packet size	200bit
Packet header size	200bit
Multihop broadcast packet size	200bit

データ量も削減することができるため、省電力化が見込める。

5. シミュレーションによる検討

これまで述べてきた手法のシミュレーションを行い、比較、検討を行った。シミュレーションを行った手法は、LEACH, ANTCLUST, 4.1 節の手法 (提案手法 1), 4.2 節の手法 (提案手法 2), 4.3 節の手法 (提案手法 3) の 5 つである。エネルギー消費モデルは 2 節で述べたモデルを用いる。センサは図 1 のように 100 × 100m のエリア内にランダムに分布させ、基地局は [50,175] の地点に配置し、センサは常に基地局に送信すべきデータを観測していると仮定する。シミュレーションに用いた各パラメータの値を表 1 に示した。また、ANTCLUST において、 $R = 40m$, $r = 20m$, $P_{ex} = 10\%$, $P = 0.5$, $p = 0.005$, 提案手法において、 $r = 20m$, $N_{opt} = 30$ とした。

ノード数 N が 100, 300, 500 のときの各手法の稼働ノード数の推移を図 2~4 に示す。シミュレーションは各手法 100 回ずつ行い、その平均を示す。ここで、Proposed.1 は提案手法 1 を、Proposed.2 は提案手法 2 を、Proposed.3 は提案手法 3 を示している。また、提案

手法 1~3 の停止ノードの分布を示すグラフを図 5~図 7 に示す。

図 2~4 を見ると、LEACH や ANTCLUST はノード数が増加するにつれて、稼働時間が短くなっているが、提案手法はノード数によらずほぼ同程度の時間稼働していることが分かる。これは提案手法が近傍ノード数によってクラスタ半径を変化させる手法であり、ノード数の増加に合わせてクラスタヘッドの数も増加するため、一つのノードが大量の送受信を行わずにすむからであると考えられる。また、マルチホップ通信を使用した場合、使用していない場合よりもネットワーク全体がより長く稼働していることが分かる。これは、ノードのエネルギー残量を考慮したマルチホップ通信を取り入れたことにより、ネットワーク内のノードの位置によって不利が生じることを防止できたからであると考えられる。図 5~7 を見ると、マルチホップ通信を使用していない場合 (図 5) は基地局から遠いノードが早いラウンドで停止しているが、マルチホップを使用した場合 (図 6,7) では、ネットワーク内の位置に関わらずどのノードもほぼ同程度の時間稼働できていることが分かる。このことから、マルチホップ通信を用いることによって基地局からの距離による不利を無くすることができることが分かった。また、マルチホップ通信時にデータ圧縮を行うと、通信時のコストを抑えることができるため、多少長く稼働していることが分かる。

6. まとめ

本稿では、各ノードが小規模で少ないブロードキャストを行うことによって、自律的かつ効率的にクラスタを形成するクラスタリング手法を提案した。提案手法は LEACH や ANTCLUST よりもクラスタ形成時の通信量を減少させることによってエネルギー消費を抑えることができる。シミュレーションによる評価の結果、提案手法はネットワーク内のノード数によらず LEACH や ANTCLUST よりも長期間ネットワークを稼働させることが可能であり、よい性能を示すことがわかった。また、マルチホップ通信を適用することによって、基地局からの距離による各ノードの不利を無くすことができ、より長期間ネットワーク全体を稼働させることが出ることがわかった。今後の課題として、より効率的なクラスタの形成手法を検討し、より長期間のネットワークの稼働を目指していきたい。

謝辞 本研究は科研費 (20500070) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Heinzelman, W.B., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *Proc. HICSS-33*,

pp.3005-3014 (2000).

- 2) Younis, O. and Fahmy, S.: HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for AdHoc Sensor Networks, *IEEE Trans on Mobile Computing*, V3, N4, pp.366-379 (2004).
- 3) Chan, H. and Perring, A.: ACE: An Emergent Algorithm for Highly Uniform Cluster Formation, *Proc. 1st Euro Workshop Sensor Networks*, pp.154-171 (2004)
- 4) Kamimura, J., Wakamiya, N. and Murata, M.: A Distributed Clustering Method for Energy-Efficient Data Gathering in Sensor Networks, *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, V1, I2, pp113-120 (2006).
- 5) Soro, S. and Heinzelman, W.B.: Cluster Head Election Techniques for Coverage Preservation in Wireless Sensor Networks, *Ad Hoc Networks*, 7, pp.955-972 (2009).
- 6) Shgei, N. Miyajima, H., Morishita, H. and Maeda, M.: Centralized and Distributed Clustering Methods for Energy Efficient Wireless Sensor Networks, *Proc. Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, Vol.I, pp.423-427 (2009).
- 7) Abbasi, A.A., and Younis, M.: A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks, *Computer Communications*, Vol.30, pp.2826-2841 (2007).
- 8) Sundararaman, B., Buy, U. and Kshemkalyani, A.D.: Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: a Survey, *Ad Hoc Networks*, V3, pp.281-323 (2005)

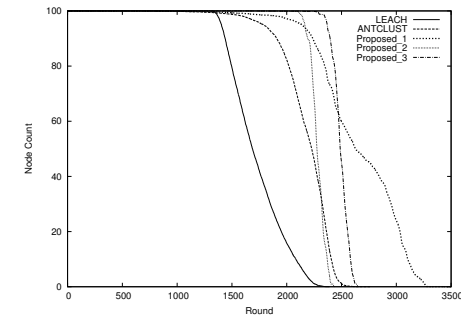


図 2 稼働ノード数の推移 (ノード数:100)

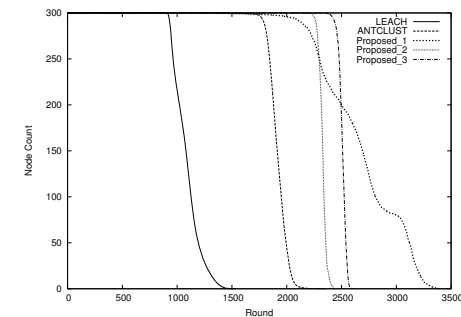


図 3 稼働ノード数の推移 (ノード数:300)

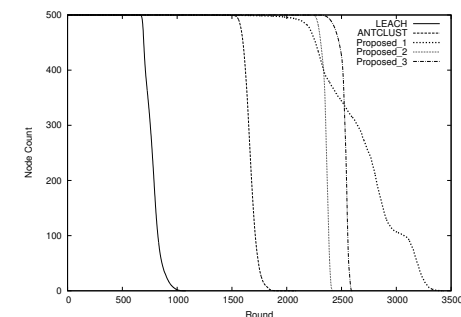


図 4 稼働ノード数の推移 (ノード数:500)

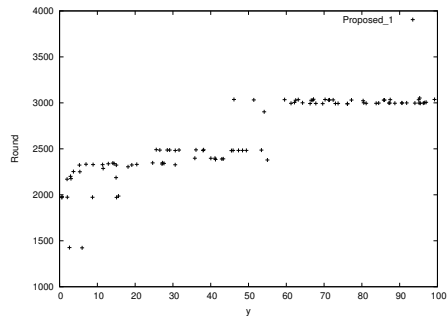


図 5 提案手法 1 のノードの位置と停止ラウンドの関係性 (ノード数:100)

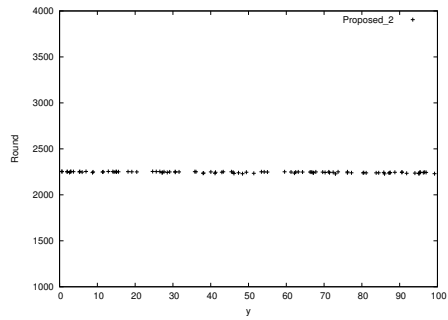


図 6 提案手法 2 のノードの位置と停止ラウンドの関係性 (ノード数:100)

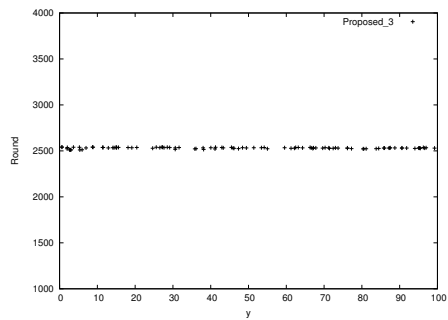


図 7 提案手法 3 のノードの位置と停止ラウンドの関係性 (ノード数:100)