

# センサネットワークのための位置情報を用いた階層的省電力化手法の評価

稲垣 徳也<sup>†</sup> 石原 進<sup>††</sup>

無線センサネットワークでは、無線センサノードを観測したい領域に配置し、それらノード間におけるマルチホップ通信を用いて観測者へセンシングされたデータが送信される。その際、センサノードには電源容量の限られた小型端末が使用され、ネットワークの維持のために稼動端末の省電力化が重要となる。そこで、筆者らはセンサネットワークにおける位置情報を利用した省電力手法であるGAF(Geographical Adaptive Fidelity)に階層構造を導入し、必要最低限のノードを動的に利用することでさらなる省電力化を図る電力制御手法HGAF(Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity)を提案している。本稿ではそのシミュレーション評価について述べる。シミュレーションの結果、HGAFはGAFと比べてノード寿命とパケット到達率の点で優れていることが確かめられた。

## A evaluation of a hierarchical power saving technique using location information for sensor networks

TOKUYA INAGAKI<sup>†</sup> and SUSUMU ISHIHARA<sup>††</sup>

In the wireless sensor networks, wireless sensor nodes are placed the observation area, and the sensing data are transmitted to the observer by using the multi-hop communication between those nodes. Because wireless sensor nodes are small and have limited power supply, it is important to save power consumption on sensor nodes. In our previous work, we proposed HGAF (Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity) which introduces layered structure into GAF (Geographical Adaptive Fidelity), a power saving technique using location information in sensor networks. In this paper, we evaluate HGAF with simulation. The simulation results reveal that HGAF outperforms GAF in the viewpoint of power saving and packet delivery ratio.

### 1. はじめに

近年、センシング機能、計算処理機能、無線通信機能を有する小型センサノードを用いて基地局などのインフラに依存しないネットワークを形成し、そのセンサノードが取得したデータの収集を行うシステムである無線センサネットワークが注目を浴びている。無線センサネットワークでは電源容量の限られるノードを人が物理的に接触して管理するには困難な場所へ配置することも考えられており、いかに限られた電源容量で効率よくネットワークを形成するかが重要課題となっている。

無線センサネットワークでは省電力化に関して様々な研究が行われている。その研究の一つにノードを高密度に配置して必要最低限のノードを動的に利用する適応型トポロジの研究がある。筆者らの提案し

ているHGAF(Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity)<sup>7)</sup>はこの研究に位置する。

適応型トポロジの研究にはさまざまな手法が提案されている。ノード位置に応じてノードのグループ分けを行い、各グループ内においてルーティングの役割を担うアクティブノードを1台選出し、それ以外のノードをスリープさせるGAF(Geographical Adaptive Fidelity)<sup>1)</sup>や各ノードが定期的にHELLOメッセージをやり取りを行い、近隣ノードとの接続性と電力残量をもとに自身のノードがアクティブになるかスリープになるか決定させるSPAN<sup>2)</sup>などがある。

適応型トポロジの研究以外にもメタデータを用いて通信データ量を少なくすることで電力消費を抑える手法<sup>3)</sup>や電力消費を抑えるために時間の概念を通信に導入し、カウント開始と終了のシグナルを送信してその間の時間を測定させることで送信したい数字を知らせる手法<sup>4)</sup>、ネットワーク内でクラスタリングを行い、各ノードは自身のクラスタヘッドに対して割り当てられた時間だけデータを送信し、それ以外のときは休止させるスケジューリング手法であるLEACH<sup>5)</sup>、さらに、

<sup>†</sup> 静岡大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

<sup>††</sup> 静岡大学創造科学技術大学院  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

最も使用される Sink 周りのノードの寿命を電力の豊富な移動センサを用いて延ばすことでネットワーク全体の寿命を延ばす手法<sup>6)</sup> など様々な手法が提案されている。

筆者らが提案している HGAF は GAF におけるアクティブノードの選択に階層構造を導入してさらなる省電力化を図る電力制御手法である。GAF ではノード位置に応じてノードのグループ分けを行い、隣り合うグループ内のすべてのノードとの通信を保障する。このグループの中から残存電力に応じてアクティブ（電源 ON）状態のノードを選出し、クラスタヘッドとしてパケットの中継を行わせる。一方、HGAF では隣り合うグループ内のすべてのノードの通信を保障するのではなく、各グループをさらに細分化することでグループを決めて地理的領域の大きさを拡大し、ネットワーク中のアクティブノード数を減らすことでさらなる省電力化を図る。本稿ではこの HGAF を ns-2 を用いたシミュレーションにより評価を行い GAF に対する HGAF の優位性を示す。

以下、第 2 章で HGAF に関連性の高い GAF の概要を述べ、第 3 章で HGAF について概説する。第 4 章でシミュレーションによる GAF と HGAF の比較評価を行い、第 5 章で本稿をまとめる。

## 2. GAF (Geographical Adaptive Fidelity)

本章では HGAF のベースとなった GAF について概説する。GAF はノード位置に応じてノードのグループ分けを行い、各グループ内においてルーティングの役目を担うアクティブノードを 1 台選出し、それ以外のノードをスリープさせる。アクティブノードを残存電力に応じて動的に交代させることにより、GAF ではネットワーク全体の省電力化と全ノードの消費電力の均衡化を実現する。

### 2.1 状態遷移

GAF は同一グループ内のすべてのノードに均等に電力を消費させるため、アクティブノードを動的に変更し、それ以外のノードをスリープさせる。各ノードはアクティブ、スリープおよびディスカバリの 3 状態を遷移する (図 1)。このディスカバリとはアクティブとスリープの 2 つの間の状態である。各ノードはディスカバリから開始し、 $T_d$  経過後にアクティブに遷移する。 $T_d$  は電力残量が多いほど小さな値になるように計算される。ディスカバリ状態のノードがアクティブに遷移する際、自身のノード ID、グリッド ID、電力残量から計算される予想稼働時間（この時間の半分が後に説明する  $T_a$  となる）、現在の状態という 4 つ

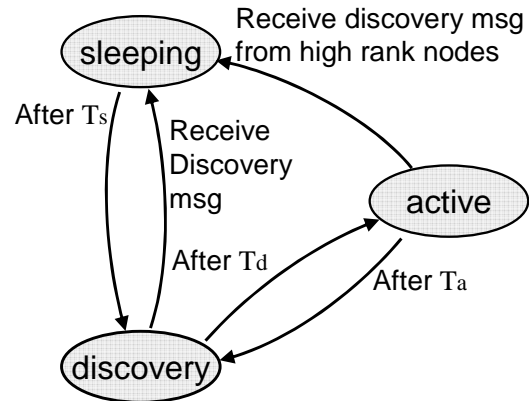


図 1 GAF における状態遷移

の情報を含むディスカバリメッセージを同一グリッド内のノードに向けてブロードキャストする。アクティブに遷移したノードは  $T_a$  経過後にディスカバリへと戻る。

ディスカバリメッセージを受信した各ノードは、自身の状態により以下の処理を行う。

- ディスカバリ状態のノードがディスカバリメッセージを受け取った場合、スリープに遷移する。
- アクティブのノードがディスカバリメッセージを受け取った場合、自身の予想稼働時間と比較し、より大きな値の予想稼働時間を含むディスカバリメッセージを受け取った時のみスリープに遷移する。

ディスカバリノードがアクティブに遷移する時以外にもディスカバリメッセージは送信される。アクティブノードはアクティブになった後も  $T_d$  間隔でディスカバリメッセージを送信し続ける。また、スリープに遷移するノードは、受信したディスカバリメッセージに含まれる予想稼働時間を基にスリープ時間  $T_s$  を計算し、スリープを  $T_s$  続けた後にディスカバリへと遷移する。

### 2.2 グリッド分割

GAF は各ノードがあらかじめ自身の位置情報を得ていることを前提として設計されている。グループ分けには正方格子のグリッドを用いる。このグリッドは、隣接グリッド内のすべてのノード同士が通信できるように構成される。そのため、GAF では隣接する 2 つのグリッド内の 2 点間における最長距離をノードの通信可能最大半径以下にすることでグリッドの一辺の長さ  $r$  を決定する (図 2)。通信可能最大半径を  $R$  とするとグリッドの一辺の長さ  $r$  は

$$r^2 + (2r)^2 \leq R^2 \quad (1)$$

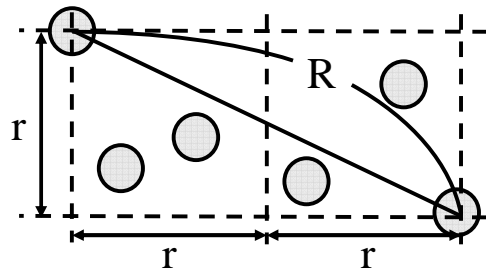


図2 GAFにおけるグリッドの一边の長さ

なので  $r$  は

$$r \leq \frac{R}{\sqrt{5}} \quad (2)$$

を満たす必要がある。

### 3. HGAF (Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity)

#### 3.1 基本概念

GAF では隣接グリッド内におけるすべてのノード同士の通信を保障する。この条件から、グリッドの一边の長さ  $r$  が決定される。(2) 式より、GAF では少なくとも面積  $R^2/5$  につき 1 台以上のアクティブノードが必要となる。

HGAF は以下の考え方に基づいてグリッド面積を  $R^2/5$  よりも大きくし、ネットワーク内のアクティブノード数を少なくすることで電力消費量を抑制する。隣接グリッド内におけるすべてのノード同士の通信を保障させるのではなく、グリッド内のアクティブノードの場所をグリッドの特定の位置に限定し、その位置をすべてのグリッドで同期させれば、グリッドを GAF の場合よりも大きくさせることができる(図3)。

隣接グリッド内のアクティブノード間の通信、およびアクティブノードとそれが含まれるグリッド内の他のノードとの通信が保障できれば、アクティブノードを介した中継により任意のノードからの通信が可能である。したがって、アクティブノード間の距離を  $R$  以下にすればよい。アクティブノード間と同様にグリッドの一边の長さも  $R$  以下とすることができるので、少なくとも面積  $R^2$  につき 1 台以上のアクティブノードがあればよい。つまり、GAF においてアクティブノードの場所を限定させることで、ネットワーク上のアクティブノードを最大 1/5 まで減らすことが可能となり、ネットワーク全体の消費電力を抑えられる。

#### 3.2 前提条件

HGAF では GAF のグリッドをさらに均等に細分化する。細分化されたグリッドの 1 つ 1 つをサブグリッ

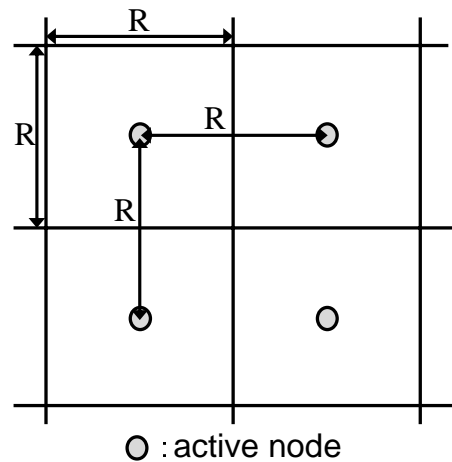


図3 ノード位置を限定した場合のグリッドの一边の長さ

ドと呼ぶ。すべてのノードは位置情報を取得しているものとし、時刻同期もされているものとする。配置されたノードは予め登録されているグリッドおよびサブグリッドの位置情報を基に自身が所属するグリッドおよびサブグリッドを認識する。また、すべてのノードで通信範囲は同じ、かつ不変とする。なお、ノードの途中参加および時刻同期については本論文では扱わないこととする。

#### 3.3 階層化されたアクティブノード選出処理

HGAF はグリッド内のサブグリッドのうちの 1 つをアクティブサブグリッドとし、この中に含まれる 1 台のノードのみを GAF と同様の状態遷移に基づく選出処理によってアクティブノードとして選出する。アクティブグリッドの選択をすべてのグリッド内で同期することで、グリッド内でのアクティブノードの位置を限定する。以下、アクティブサブグリッド以外のサブグリッドをスリープサブグリッドと呼ぶ。スリープサブグリッド内のノードはすべてスリープする。

HGAF では、GAF と同様に隣接グリッド内のアクティブノード間の通信が保障される必要がある。したがって、隣接グリッドに含まれるアクティブサブグリッド内の最長の 2 点間の距離(図4の OP)はノードが持つ通信デバイスにおける通信可能最大半径  $R$  以下となる。また、アクティブノードはクラスタヘッドの役目も果たすことから、同一グリッド内のアクティブノードと任意のノード間の通信も保障される必要がある。そのため、同一グリッド内の最長の 2 点間の距離(図4の OQ)も同様にノードが持つ通信デバイスにおける通信可能最大半径  $R$  以下となる。

#### 3.4 アクティブノード数の減少効果

グリッド一辺あたりのサブグリッドの個数を  $N$  (分

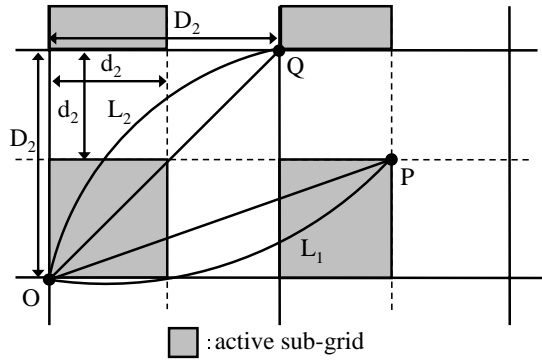


図4 グリッドを4分割したHGAFにおけるグリッドの一边の長さ

割数:  $N^2$ )とした時のグリッドおよびサブグリッドの一边の長さをそれぞれ  $D_N$ ,  $d_N$  とすると, 隣接グリッドの同一の場所に位置するサブグリッド間において最も遠い2点間の距離が通信最大半径  $R$  以下とならなければならないため,

$$L_1 = (d_N)^2 + ((N+1)d_N)^2 \leq R^2 \quad (3)$$

が満たされる必要がある. よって,  $d_N$  は

$$d_N \leq \frac{1}{\sqrt{(N+1)^2 + 1}} R \quad (4)$$

となり,  $D_N = Nd_N$  なので  $D_N$  は

$$D_N \leq \frac{N}{\sqrt{(N+1)^2 + 1}} R \quad (5)$$

となる. これにより, サブグリッド面積  $s_N = (d_N)^2$  およびグリッド面積  $S_N = (D_N)^2$  はそれぞれ,

$$s_N \leq \frac{1}{(N+1)^2 + 1} R^2 \quad (6)$$

$$S_N \leq \frac{N^2}{(N+1)^2 + 1} R^2 \quad (7)$$

となる.

次に, グリッド内における最長の2点間の距離はグリッドの対角線の長さとなることから, 以下の条件を満たす必要がある.

$$L_2 = \sqrt{2}D_N \leq R \quad (8)$$

したがって, 式(5)より

$$\frac{\sqrt{2}N}{\sqrt{(N+1)^2 + 1}} R \leq R \quad (9)$$

となり, これを満たす整数  $N$  は1と2のみとなる. このことから,  $N \geq 3$  の場合においてはグリッドの対角線の長さを  $R$  にする必要がある. したがって,  $N \geq 3$  におけるグリッドの一边の長さ  $D_N$  は,

$$(D_N)^2 + (D_N)^2 \leq R^2 \quad (10)$$

と表すことができる. よって,  $S_N$  は

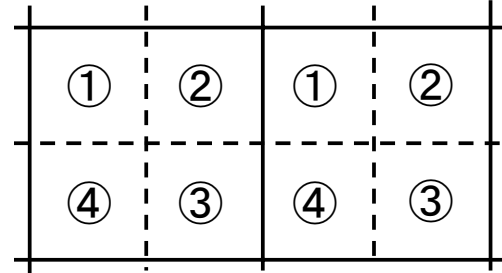


図5 グリッドを4分割した場合におけるアクティブサブグリッド交代順

$$S_N \leq \frac{1}{2} R^2 \quad (11)$$

となる. つまり,  $N \geq 3$  の場合においてはグリッドの分割数を増やしてもグリッド面積は  $R^2/2$  より大きくすることができない. しかし, この問題は筆者らが提案している拡張HGAF<sup>7)</sup>を用いることで解決でき,  $N$  の増加と共にグリッド面積を拡大することが可能となる.

また, 観測する領域の面積を  $A$  とすると, 領域内のサブグリッド数  $m$  は,

$$m \geq \frac{A}{s_N} = \frac{A((N+1)^2 + 1)}{R^2} \quad (12)$$

となる. このことにより, 観測する領域内のノード密度を  $B$  とすると, サブグリッドの中に最低でも1台以上のノードが必要であるので  $B \geq m/A$  が満たされる必要がある.

### 3.5 アクティブサブグリッドのローテーション

グリッド内のすべてのノードが均等に電力を消費するようにHGAFでは  $T$  毎にアクティブサブグリッドのローテーションを行う. アクティブサブグリッドの交代順はすべてのグリッドにおいて同じとする必要がある. これは, すべてのグリッド内においてアクティブノードの位置を限定させ, 隣接するグリッド内アクティブノード同士の通信を保障するためである. すべてのノードはサブグリッドの交代タイミングを知っており, 自身の属するサブグリッドの状態(アクティブ/スリープ)を知っているものとする.

アクティブサブグリッドの交代順は前後のアクティブサブグリッドが隣接するようにする(図5). これは時刻および位置情報の誤差の影響を軽減するためである. 各サブグリッドにおいて時刻誤差が生じたノードがいた場合, 実際にはスリープサブグリッド内に存在するにもかかわらず, 位置情報の誤差, あるいは時刻同期のずれによって自身が現在のアクティブグリッドに存在すると判断して, アクティブグリッドになるとするノードが発生しうる. アクティブノードの選出処理は, 同時にアクティブノードになるとする端末

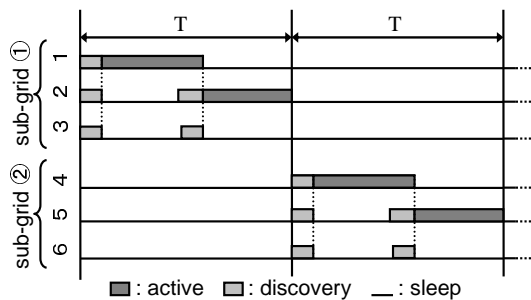


図6 アクティブサブグリッドの交代毎のGAF手法の適応例

間が相互にお互いの発する信号を受信することによって行われるので、互いの通信範囲外にあるノードがアクティブになろうとした場合には、グリッド内で複数のノードがアクティブになってしまう。アクティブグリッドの交代順序が隣接グリッド同士で続いていけば、位置誤差、時刻誤差の影響によって、互いに通信範囲外にあるノードがアクティブになろうとする機会が減少する。

アクティブサブグリッドのローテーション順の導出はグラフ理論における無向ハミルトン閉路問題となる。ただし、グリッドを偶数個のサブグリッドに分割した場合にはハミルトングラフとなるが、奇数個のサブグリッドに分割した場合には準ハミルトングラフとなり閉路にはならない。したがって、グリッドを奇数個のサブグリッドに分割した場合においては最初と最後のアクティブサブグリッドを隣り合わせることはできない。よって、グリッドを奇数個のサブグリッドに分割した場合は最初と最後のアクティブサブグリッドがなるべく近くなるように設定することで補う。

#### ・アクティブサブグリッドの交代処理の例

図6にアクティブサブグリッドの交代処理の例を示す。サブグリッド1および2にノードが各3台存在し、サブグリッド1からアクティブサブグリッドを開始することとする。文献7)ではアクティブサブグリッドの交代手法として4つの方法を提示しているが、ここではその内最も基本的な交代処理の例を示す。

サブグリッド1内のすべてのノードはアクティブサブグリッドになると同時にディスカバリへ遷移する。電力残量が最も多いノード1がアクティブに遷移した後、ディスカバリメッセージを送信する。このメッセージを受信したノード2,3はスリープへ遷移し、ノード1の予想稼働時間よりも前にディスカバリへ戻る。ノード2がアクティブに遷移する際に送信するディスカバリメッセージをノード1が受信すると、ノード1はそのメッセージに含まれるノード2の電力残量と自

身の電力残量を比較し、ノード2の方が多い場合にスリープへ遷移する。

アクティブであるノード2は、自身が含まれるサブグリッド1がアクティブでなくなる時刻に達するとスリープへ遷移する。アクティブサブグリッドの期間が終了したサブグリッド内のすべてのノードは次のアクティブサブグリッドの開始時までスリープする。サブグリッド1の次にサブグリッド2がアクティブとなると、サブグリッド内のノードはディスカバリへ遷移し、前述のサブグリッド1の場合と同様に、GAFの交代処理を行う。

上記の手法ではアクティブサブグリッド内のすべてのノードはディスカバリから開始するため、周期的にネットワーク上のアクティブノードが存在しない期間が生じてしまう。ただし、この問題は、文献7)で提案している方式1~3を用いることで解決できる。

## 4. 評価

HGAFはGAFに階層構造を用いることでさらなる省電力化を図る電力制御手法である。そのため、同じノード配置においてGAFおよびHGAFを適用したネットワークの寿命およびパケット到達率の変化を比較する。

ネットワークシミュレータns-2を用いてシミュレーションを行った。各シミュレーション条件は基本的にGAFの論文<sup>1)</sup>に従った値を用いた。HGAFでのグリッドの一辺あたりの分割数 $N=2$ 、アクティブグリッドのローテーション間隔 $T=100[s]$ とし、アクティブサブグリッドの交代処理は3.5の例で示した最も単純な方式を用いる。また、シミュレーション時間を6000[s]とした。すべての結果はシミュレーションを10回行った平均値である。

### 4.1 シミュレーション領域の決定

第3章で述べたように、GAFおよびHGAFを適用した場合のネットワーク上のアクティブノード数はグリッド面積に依存する。そのため、このグリッドを適用するためのシミュレーション領域の決定には、HGAF, GAF間の公平性を損なわないように慎重に選ぶ必要がある。

ノードの通信可能最大半径を250[m]とすると、(2)式よりGAFにおける最大のグリッドは一辺の長さ118.80[m]となる。また、(5)式よりHGAFにおける最大のグリッドは一辺の長さ158.11[m]となる。グリッドをシミュレーション領域にあてはめる際、1つのグリッドをこの最大のグリッド以下にする必要がある。そのため、公平性を持たせるためにはGAFおよびHGAF

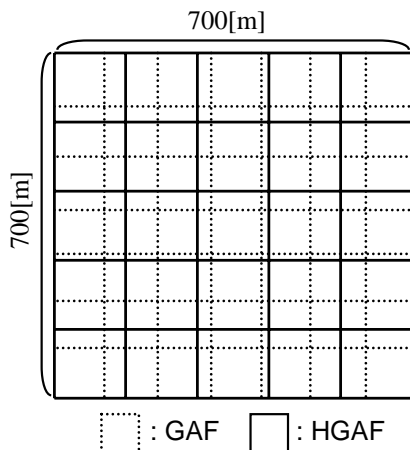


図7 領域サイズの決定

における最大のグリッドと実際に使用するグリッドの面積比をほぼ一定にする必要がある。

本評価ではシミュレーション領域を 700[m] × 1400[m] とした。これは 700[m] × 700[m] の領域 (図7) を2つ並べた大きさである。シミュレーションでは各 700[m] × 700[m] の領域に GAF および HGAF はそれぞれ 45 個, 25 個のグリッドを配置した。このとき, GAF および HGAF のグリッドはそれぞれ一辺 100[m], 140[m] の正方形となる。通信可能距離から計算される最大のグリッドと比較すると一辺の長さは GAF では 0.894 倍, HGAF では 0.885 倍となる。したがって, GAF は最大のグリッド面積の 0.806 倍, HGAF は最大のグリッド面積の 0.783 倍のグリッドを使うこととなる。HGAF の方が若干最大のグリッドに対する比が小さくなっているため, HGAF の優位性を示すために十分公平な条件であるといえる。

#### 4.2 トラフィックおよびノード配置

データ生成ノードを 10 台, 転送ノードを 100, 200, 400 台の3通りの場合でシミュレーションを行った。すべてのノードはランダムに配置され, 移動しないものとした。データ生成ノードはデータの生成および宛先の2つの役割を持つ。すべてのデータ生成ノードはデータ生成ノードの中からランダムに決定された宛先に向け, データ生成ノード全体で計 10[pkt/s] の 512[byte] のパケットを送信する。通信規格は IEEE802.11b (2[Mbps]) とし, ルーティングアルゴリズムには AODV を用いた。転送ノードはデータの生成は行わず, データの転送のみを行い, 転送ノードにのみ GAF および HGAF を適用する。

#### 4.3 電力消費モデル

転送ノードの電源容量は 400[Ws] とし, データ生

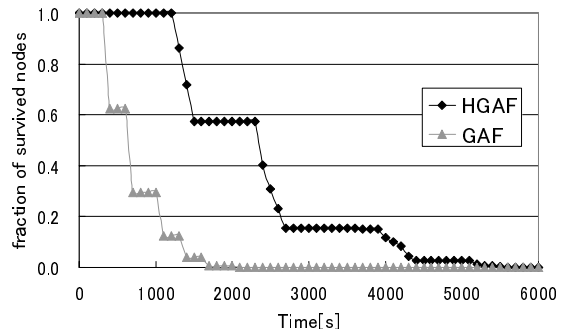


図8 転送ノード 100 台におけるノード寿命の比較

成ノードの電源容量は無量大とした。電力消費は伝送距離に関わらず送信消費電力 1.6[W], 受信消費電力 1.2[W], 待機消費電力 1[W], 休止消費電力 0.025[W] とした。また, GAF および HGAF では予め位置情報を与えるものとし, 位置情報取得のための消費電力は考えない。

#### 4.4 ノード寿命の比較

図8, 図9, 図10に転送ノード数 100, 200, 400 台の時の GAF と HGAF の時間経過に対するノードの存続率 (電力残量が 0 より大きいノードの割合) の変化を示す。転送ノードの台数に関わらず, HGAF は GAF よりも常にノードの存続率が高い結果が得られている。これにより, GAF よりも HGAF の方がノードの寿命を延ばす効果が大きいことが確認できた。

図8, 図9, 図10より, GAF および HGAF ではノード台数を増やすほどノードが存続しやすくなっている。これは GAF における状態遷移を用いた交代処理のためである。ノード台数を増やすことでグリッド内のノード数が増え, 各ノードは他の状態と比較して消費電力が高いアクティブノードとなる可能性が下がる。これにより, すべてのノードの平均消費電力が下がりノードの寿命が延びる。従って, GAF も GAF における状態遷移を用いた交代処理を用いた HGAF も同様の傾向を示す。

#### 4.5 パケット到達率の比較

図11, 図12, 図13に転送ノード数 100, 200, 400 台の時の GAF と HGAF の時間経過に対するパケットの到達率の変化を示す。転送ノード数が 200, 400 台の場合では HGAF は GAF に比べてパケットの到達率が高い状態を維持している時間が長いことが分かる。これはノードの寿命を延ばすことにより, アクティブノード台数が減りにくく, GAF に比べて転送を行うノード数減少しにくいからである。

図11より, 転送ノード数 100 台の場合では 800[s]

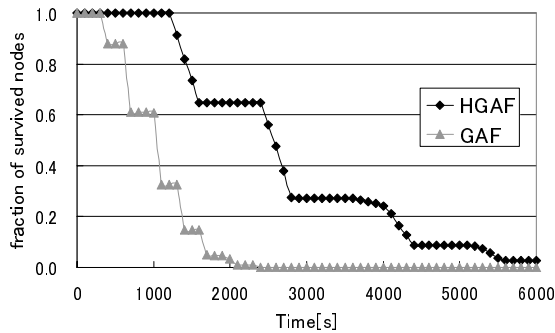


図 9 転送ノード 200 台におけるノード寿命の比較

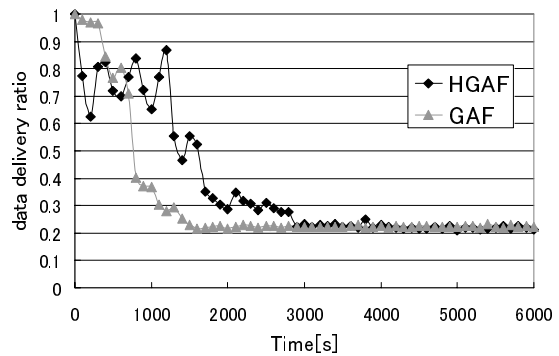


図 11 転送ノード 100 台におけるパケット到達率の比較

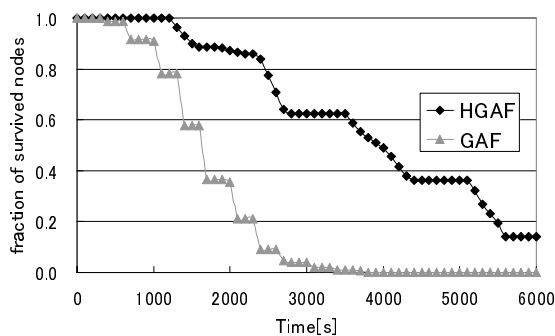


図 10 転送ノード 400 台におけるノード寿命の比較

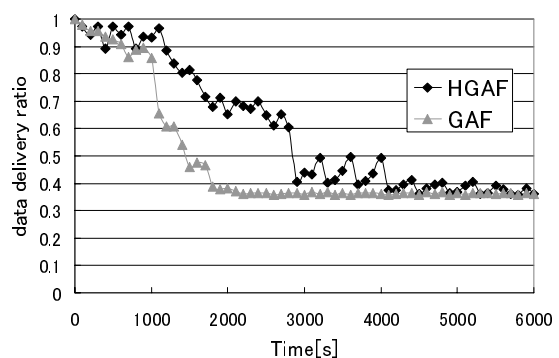


図 12 転送ノード 200 台におけるパケット到達率の比較

付近まで HGAF は GAF に比べてパケットの到達率が低いことが分かる。これは、シミュレーション領域  $700[m] \times 1400[m]$  では HGAF のサブグリッド数が 200 個となり、転送ノード数 100 台ではサブグリッド中にノードが存在しない可能性が高いためである。そのため、各グリッドにアクティブノードが存在しない期間が生じやすく、転送を行うノードの台数が少ない。この結果、データ生成ノードから宛先ノードまでの経路が断絶され、パケットが破棄されたためにパケット到達率が低下する。

図 11、図 12、図 13 より、転送ノード数 100、200、400 台すべてにおいて経過時間と共にパケットの到達率がある一定値に収束していることが分かる。これはランダムでデータ生成ノードを配置するため、1 ホップ内の通信範囲に宛先ノードが存在する場合があるためである。このため、転送ノードをかえさずにデータ生成ノード同士で通信を行うのでパケットの到達率は 0 にはならない。

## 5. まとめ

本論文ではセンサネットワークにおける位置情報を利用した省電力手法である GAF のアクティブノード

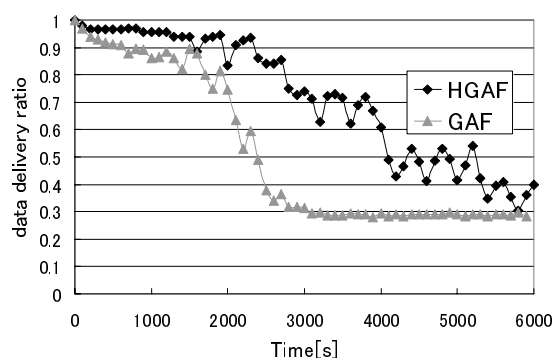


図 13 転送ノード 400 台におけるパケット到達率の比較

選択に階層構造を導入し、GAF よりもネットワーク内のアクティブノード数を減らすことでさらなる省電力化を図る手法 HGAF のシミュレーション評価について述べた。ns-2 によるシミュレーションの結果、HGAF は GAF よりもノード寿命とパケット到達率の点で優れていることが示された。

本評価では GAF の論文とほぼ同じシミュレーション条件を用いたため、伝送距離に関わらず消費電力が一定とした。しかし、現実では伝送距離により消費電力が異なるため、伝送距離を長く取る HGAF では本稿

の条件とは異なる結果になる可能性がある。そのため、今後伝送距離により消費電力が異なる場合の評価を行う必要がある。また、この他に今後の課題として、文献 7) で提案した拡張 HGAF や他のアクティブサブセル交代スケジュール、ノードの配置やトラフィックに偏りがある場合のシミュレーションによる評価、ノード間における時刻同期方法の検討などが挙げられる。

## 謝 辞

本研究は科学研究費補助金萌芽研究 19650009 の助成の下実施された。ここに記して謝意を示す。

## 参 考 文 献

- 1) Ya Xu, John Heidemann and Deborah Estrin: "Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," in proc. of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), 2001.
- 2) Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan and Robert Morris: "Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks," in proc. of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), 2001.
- 3) Huifang Chen, Hiroshi Mineno and Tadanori Mizuno: "A Meta-Data-Based Data Aggregation Scheme in Clustering Wireless Sensor Networks," in proc. of International Workshop on Mobile Location-Aware Sensor Networks (MLASN), pp.43-49, 2006.
- 4) Yujie Zhu and Raghupathy Sivakumar: "Challenges: Communication through Silence in Wireless Sensor Networks," in proc. of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'05), 2005.
- 5) Wendi B. Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan: "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, October 2002.
- 6) Wei Wang, Vikram Srinivasan and Kee-Chaing Chua: "Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks," in proc. of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'05), 2005.
- 7) 稲垣徳也, 石原進: "センサネットワークにおける位置情報を用いた階層的省電力化手法の提案," 情報処理学会研究会報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信, Vol.2007, No.14, pp.1-8 (2007-02).