

## 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検討

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働端末の省電力化が重要となる。そこで、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(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であるHGAF(Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity)を提案する。

### A proposal 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 this paper, we introduce a layered structure into GAF (Geographical Adaptive Fidelity), a power saving technique using location information in sensor networks. and we propose a novel power saving technique HGAF (Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity).

#### 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。従来のネットワークではスループットの向上や遅延対策が優先課題であったが、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大きな課題となっている。

そこで、この無線センサネットワークにおける課題を解決するために様々な手法が提案されている。まず、ノードを高密度に配置し必要最低限のノードを動的に利用することによりネットワーク全体の寿命を延ばす手法であるGAF<sup>1)</sup>およびSPAN<sup>2)</sup>が提案されている。また、この他にも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>3,4)</sup>や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する手法であるLEACH<sup>5)</sup>。さらに、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>などが提案されている。

本論文ではノードを高密度に配置し、必要最低限のノードを動的に利用することによりネットワーク全体の寿命を伸ばす手法であるGAF(Geographical Adaptive Fidelity)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HGAF(Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity)を提案する。

#### 2. GAF (Geographical Adaptive Fidelity)

GAF(Geographical Adaptive Fidelity)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。

<sup>†</sup> 静岡大学工学部

Faculty 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

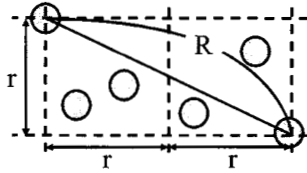


図1 GAFにおけるセルの一边の長さ

## 2.1 セル分割

GAFは各ノードは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セルを用いる。このセルは、隣り合うセル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では隣り合う2つのセル内の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セルの一边の長さ $r$ を決定する(図1)。通信可能最大半径を $R$ とするとセルの一边の長さ $r$ は

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

なので $r$ は

$$r \leq \frac{R}{\sqrt{5}} \quad (1)$$

を満たす必要がある。

## 2.2 状態遷移

GAFは同一セル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。

GAFでは各ノードはアクティブ、スリープおよびディスカバリーの3状態を遷移する(図2)。このディスカバリー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ーから開始し、 $T_d$ 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。ディスカバリー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、セル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つの情報を含むディスカバリーメッセージを同一セル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 $T_d$ 経過後にディスカバリーへと戻る。

ディスカバリー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。

- ディスカバリー状態のノードがディスカバリー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ー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

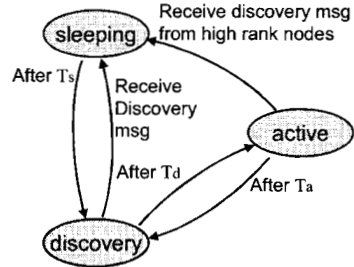


図2 GAFにおける状態遷移

リーメッセージを受け取った時にのみスリープに遷移する。

ディスカバリー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ー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ー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ー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ーへと遷移する。

## 3. HGAF (Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity)

### 3.1 基本的な考え方

GAFでは隣り合うセル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、セルの一边の長さ $r$ が決定される。(1)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。

隣り合うセル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、セル内のアクティブノードの場所をセルの特定の位置に限定し、その位置をすべてのセルで同期させれば、セルをさらに大きくさせることができる(図3)。隣り合うセル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セル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セルの一边の長さも $R$ 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。HGAFはこの考え方に基づいてアクティブノード

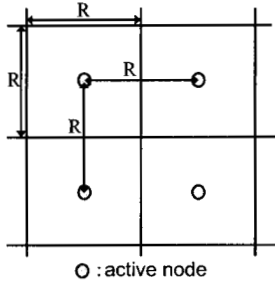


図3 ノード位置を限定した場合のセルの1辺の長さ

を選出する。

### 3.2 前提条件

HGAFではGAFのセルをさらに均等に細分化する。細分化されたセルの1つ1つをサブセルと呼ぶ。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セルおよびサブセルの位置情報を基に自身が所属するセルおよびサブセルを認識する。また、すべてのノードで通信範囲は同じ、かつ非可変とする。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はセル内のサブセルのうちの1つをアクティブサブセルとし、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。アクティブセルの選択をすべてのセル内で同期することで、セル内でのアクティブノードの位置を限定する。以下、アクティブサブセル以外のサブセルをスリープサブセルと呼ぶ。スリープサブセル内のノードはスリープする。

HGAFでは、GAFと同様に隣り合うセル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、隣り合うセルに含まれるアクティブサブセル内の最長の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以下である。

HGAFを用いることによるアクティブノード数の減少効果を以下に示す。セル1辺あたりのサブセルの個数をN(分割数:  $N^2$ )とした時のセルおよびサブセルの1辺の長さをそれぞれ $D_N$ 、 $d_N$ とすると、隣り合うセルの同一の場所に位置するサブセル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、

$$(d_N)^2 + ((N+1)d_N)^2 \leq R^2$$

が満たされる必要がある。よって、 $d_N$ は

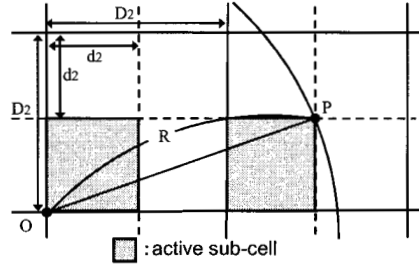


図4 セルを4分割したHGAFにおけるセルの1辺の長さ

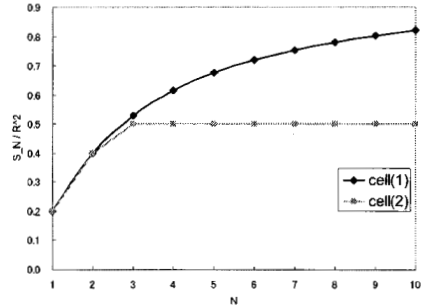


図5 セルの分割数とセル面積の関係

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

となり、 $D_N = Nd_N$ なので $D_N$ は

$$D_N \leq \frac{N}{\sqrt{(N+1)^2 + 1}} R \quad (3)$$

となる。これにより、サブセル面積 $s_N = (d_N)^2$ およびセル面積 $S_N = (D_N)^2$ はそれぞれ、

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

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

となる。

図5のcell(1)にNと $S_N$ の関係を示す(cell(2)は後に述べる)。なお、同図において $N=1$ の場合がGAFに相当する。同図より、Nが大きくなるほどセル面積 $S_N$ が大きくなるのが分かる。これはサブセルの面積を小さくすることでノードの場所を限定することができ、決まった場所のみで通信を行うことが可能となるためである。

次に、観測する領域の面積をAとすると、領域内のサブセル数mは、

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

となる。このことにより、観測する領域内のノード密

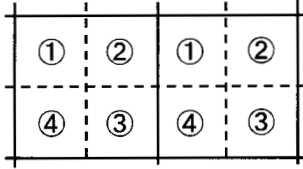


図6 セルを4分割した場合におけるアクティブサブセル交代順

度を  $B$  とすると、サブセルの中に最低でも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。

GAFと同様にアクティブノードは、同一セル内のノードに対するクラスタヘッドとなる（同一サブセルのクラスタヘッドではないことに注意）。したがって、アクティブノードは自身が属すセル内のすべてのノードと通信可能でなければならない。セル内における最長の2点間の距離はセル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。

$$\sqrt{2}D_N \leq R$$

したがって、式(3)より

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

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、 $N \geq 3$  の場合においてはセルの対角線を  $R$  とすることでセル面積を抑える必要がある。したがって、 $N \geq 3$  におけるセルの辺の長さ  $D_N$  は、

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

と表すことができる。よって、 $S_N$  は

$$S_N \leq \frac{1}{2}R^2$$

となる。つまり  $N \geq 3$  の場合においてはセルの分割数を増やしてもセル面積は  $R^2/2$  より大きくすることができない(図5の cell(2))。ただし、この制限は、3.6で述べる拡張方式を用いることで避けることが可能である。

### 3.4 アクティブサブセルのローテーション

アクティブサブセルは一つのサブセルだけで固定してしまうと消費電力の偏りが生じてしまい、ネットワークの寿命が短くなる。そこで、HGAFでは時間  $T$  毎にアクティブサブセルのローテーションを行う。アクティブサブセルの交代順はすべてのセルにおいて同じとする。すべてのノードはサブセルの交代タイミングを知っており、自身の属するサブセルの状態(アクティブ/スリープ)を知っているものとする。

アクティブサブセルの交代順は前後のアクティブサブセルが隣り合うようにする(図6)。これは時刻およ

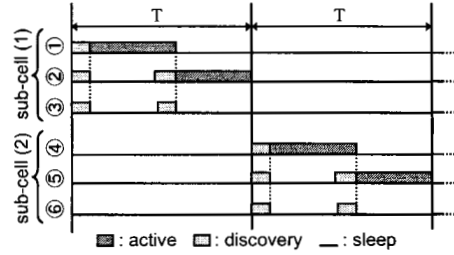


図7 アクティブサブセルの交代毎のGAF手法の適応例

び位置情報の誤差の影響を軽減するためである。各サブセル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セル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セルに存在すると判断して、アクティブセルになろう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ろうとする端末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、セル内で複数のノードがアクティブになってしまう。アクティブセルの交代順序が隣り合うセルが隣接していれば、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より減少する。

アクティブサブセル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、セルを偶数個のサブセルに分割した場合にはハミルトングラフとなるが、奇数個のサブセル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、セルを奇数個のサブセル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セルを隣り合わせることはできないので、最初と最後のアクティブサブセルがなるべく近くなるように交代順を設定する。

### 3.5 アクティブサブセルの交代処理

各サブセルがアクティブサブセルとなる毎に、それぞれのサブセルでGAFと同じアクティブノードの動的決定手法を時間  $T$  ずつ行うだけでは、アクティブノードが存在しない時間が発生してしまう。(図7)にこの場合のアクティブノードの選出例を示す。この問題を解決するため、以下の手法を提案する。

#### ・方式1(状態を凍結する方式)

各サブセルにおいてネットワーク起動後の1順目はGAFのアクティブノードの動的決定手法をそのまま行い、2順目以降はすべてのノードが前順における状

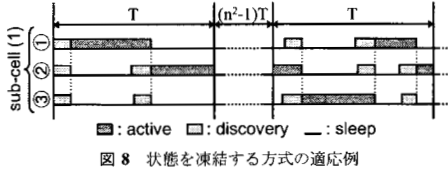


図 8 状態を凍結する方式の適応例

態の続きから始める (図 8)。

各サブセル内のノードはアクティブサブセルの終了時刻になると、各状態における  $T_a$ ,  $T_d$ ,  $T_s$  を計測するタイマを一時に停止し、スリープに遷移する。次のアクティブサブセルの開始時刻になると、そのノードは前順のアクティブサブセルの終了時刻と同じ状態に遷移し、止めていた  $T_a$ ,  $T_d$ ,  $T_s$  の時間を進める。これを繰り返すことでアクティブセルが少なくとも一台セル内に存在し続けるようにする。

しかし、この方式では 1 順目においてアクティブノードが存在しない期間が生じてしまう。そこで、この方式では自身のセル内のアクティブノードにデータを送れない際には送信側で一時的にそのデータを貯めておき、アクティブノードが存在する時にまとめて渡すことで解決する。

・方式 2 (準備期間を設ける方式)

方式 1 における 1 順目にアクティブノードが存在しない期間が生じてしまう問題は他の方法でも解決できる。すなわち、問題となる 1 順目は 2 順目のための準備期間とし、2 順目からデータのやり取りを行う方法である。

方式 1 では 2 順目以降は常にアクティブノードが存在する。そこで、1 順目では時間  $T$  の代わりに  $T_d$  の最大値である  $\max(T_d)$  を用いてアクティブサブセルのローテーションを行う。  $\max(T_d)$  ずつローテーションを行うことで、各サブセル内の任意の 1 台をアクティブノードとすることができる。

一方、この方式では 1 順目を準備期間とするので、データのやり取りを行う期間以外に電力を余分に消費してしまう。しかし方式 1 とは違い、絶え間なくアクティブノードを存在させることが可能となる。そのことにより、アクティブノードが存在しない期間にデータを貯めておく必要がなくなる。

・方式 3 (アクティブ状態を延長させる方式)

この方式では常にアクティブサブセルの終了時のアクティブノードが次のアクティブノードが決定するまでの間、アクティブ状態を継続する (図 9)。アクティブサブセルが交代する際、アクティブノードは自身のアクティブサブセル終了時刻に予想稼働時間  $T_a$  を破棄し、アクティブ状態を継続する。このノードは次のア

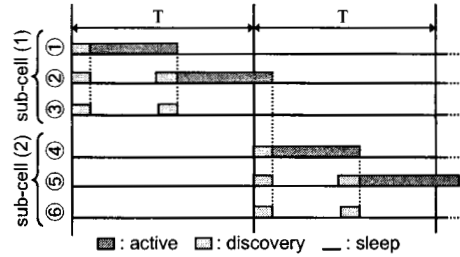


図 9 アクティブ状態を延長させる方式の適応例

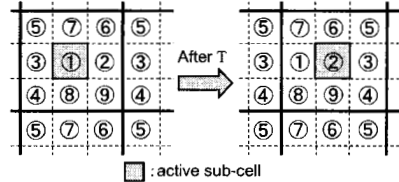


図 10 拡張 HGAF によるセルの移り変わり

クティブサブセルのディスカバリーメッセージを受信した後にスリープへ遷移する。このことにより、GAF のアクティブノードの動的決定手法をそのまま行う場合の欠点を補い、各セル内に絶え間なく 1 台のアクティブノードを維持させることができる。

一方、この方式では隣り合うセル内のアクティブノード同士の通信が保障されない場合がある。それは、すべてのセルでアクティブサブセルが時間と共にローテーションし、かつアクティブノードの選出時間  $T_d$  に依存するためである。GAF では電池残量が多いほど  $T_d$  が小さな値に決定される。そのため、サブセル間で消費電力に偏りがある場合にはアクティブノードが決定され、タイミングにばらつきが生じる。したがって、各サブセルにおいてアクティブノードの位置を正確に同期できないことが考えられる。

この方式においてアクティブノード間の通信を保障するためには、隣接するセルの交代前後のサブセル間で相互に通信可能となるようにサブセルの一边の長さを縮める必要がある。このため、GAF よりもネットワーク内のアクティブノードを減らすという HGAF の利点を損ねてしまう可能性もある。しかし、メッセージによりアクティブノードが交代するので、上記 2 つの方式に比べて時刻誤差がある場合に有効であると考えられる。

3.6 拡張 HGAF

HGAF において  $N \geq 3$  の場合ではセルの分割数を増やしてもセル面積は  $R^2/2$  より大きくできない。そこで、セル内のアクティブノードの位置を限定させる

ことで同一セル内のすべてのノードとアクティブノードとの通信を保障し、HGAFよりもセル面積を大きくできる拡張HGAFを提案する。

拡張HGAFでは同一セル内のすべてのノードとアクティブノードとの通信を保障するため、セル内におけるすべての点との最長距離が最も短くなる中心点を含むサブセルのみをアクティブサブセルとする。また、HGAFと同様に拡張HGAFでもアクティブサブセルがローテーションする。したがって、常にアクティブサブセルをセルの中心のサブセルにさせるため、アクティブサブセルの交代と共にそのサブセルを中心とするセルも同じ方向に移り変わる(図10)。すべてのセルでこのセルの移り変わりを同期し、すべてのノードが常にセルの移り変わりを理解することでセル内のクラスタヘッドとなるアクティブノードに対してデータを送信することができる。

HGAFの拡張を行うことにより、セルを複数に分割した場合においてもアクティブノードとそのセル内のすべてのノードとが通信可能であることを示す。以下、セルを奇数個のサブセルに分割した場合と偶数個のサブセルに分割した場合の2つに分けて考える。

#### ■セルを奇数個のサブセルに分割した場合

セルを奇数に分割した場合(図11)、セルおよびサブセルが正方形であるのでセルの中心点を含むサブセルが存在する。よって、セルの中心に位置するアクティブサブセルとそのセル内の2点間の最長距離(図11のOX)は図11に示すサブセル、およびセルの頂点O、W、X間の距離を用いて、

$$OX = OW + WX$$

と表すことができる。このOW, WXはサブセルの一边の長さ $d_N$ およびセルの一边の長さ $D_N$ を用いて求めることができる。OXは通信可能最大半径R以下となればよいので、

$$OX = \frac{\sqrt{2}}{2}d_N + \frac{\sqrt{2}}{2}D_N \leq R$$

が満たされる必要がある。よって、Nは奇数なので $N = 2n - 1 (n = 1, 2, 3, \dots)$ と置き換え、式(2)および式(3)を代入すると、

$$\frac{\sqrt{2}n}{\sqrt{4n^2 + 1}} \leq 1$$

となる。これは、 $n \geq 1$ より常に成立するので、セルを奇数個のサブセルに分割した場合においてはセルの分割数にかかわらず常にアクティブノードとそのセル内のすべてのノードとが通信可能である。

#### ■セルを偶数個のサブセルに分割した場合

セルを偶数個のサブセルに分割した場合(図12)に

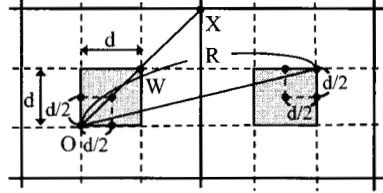


図11 セルを奇数個のサブセルに分割した場合における拡張HGAFの最長通信距離

はセルの中心点はサブセル間の境界上にあるため、この中心点を含むサブセルが存在しない。このため、この場合にはセルの中心点に接する4つのサブセルの内、1つをアクティブサブセルとする。

セルを奇数個のサブセルに分割した場合と同様に、セルの中心に位置するアクティブサブセルとそのセル内の2点間の最長距離(図12のOX)は図12に示すサブセル、およびセルの頂点O、W、X間の距離を用いて、

$$OX = OW + WX$$

と表すことができる。このOW, WXはサブセルの一边の長さ $d_N$ およびセルの一边の長さ $D_N$ を用いて求めることができる。OXは通信可能最大半径R以下となればよいので、

$$OX = \sqrt{2}d_N + \frac{\sqrt{2}}{2}D_N \leq R$$

が満たされる必要がある。Nは偶数なので $N = 2n (n = 1, 2, 3, \dots)$ と置き換え、式(2)および式(3)を代入すると、

$$\frac{\sqrt{2}(1+n)}{\sqrt{(2n+1)^2 + 1}} \leq 1$$

となる。これは、 $n \geq 1$ より常に成立するので、セルを偶数個のサブセルに分割した場合においてもセルの分割数にかかわらず常にアクティブノードとそのセル内のすべてのノードとが通信可能である。

このことにより、図5のcell(1)のようにセル内の通信を保障しない場合におけるHGAFと同様にセルの分割数を増やすことでセル面積を大きくさせることが可能となる。

## 4. 検 討

### 4.1 ネットワーク寿命におけるGAFとの比較

HGAFとGAFのネットワーク寿命を比較するため、各手法における消費電力を比較する。ノードは一律に分布しているものとし、各セルおよびサブセル内のノード数は一定とする。また、スリープにおける消費電力は待機消費電力に比べ微小なことから考えないも

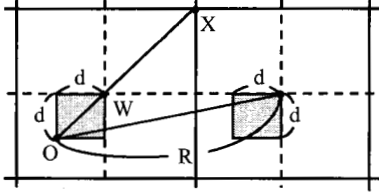


図 12 セルを偶数個のサブセルに分割した場合における拡張 HGAF の最長通信距離

のとする。

GAF と HGAF の消費電力を比較するため、セルを  $N^2$  個に分割した HGAF におけるアクティブサブセルを 1 通りローテーションさせる時間  $N^2T$  あたりの消費電力を算出する。HGAF におけるアクティブサブセルの交代処理は方式 1 を用いる。

GAF および HGAF のノード全体における単位時間あたりの消費電力を  $P_{ALL-GAF}$ ,  $P_{ALL-HGAF}$ , アクティブノードおよびディスカバリーノードの単位時間あたりの消費電力を  $P_{active}$ ,  $P_{discovery}$  とする。ノードを配置する領域の面積を  $S_{ALL}$ , GAF におけるセル面積を  $S_{GAF}$  とし, HGAF におけるセル面積を面積比  $\alpha$  を用いて  $\alpha S_{GAF}$  と表す。HGAF におけるセルの分割数の最小値は  $N = 2$  の時であるので, そのセル面積の最大値は式 (4) より  $S_2 = 0.4R^2$  となる。また, 式 (4) において  $N = 1$  の場合が GAF に相当するので, GAF におけるセル面積の最大値は  $S_1 = 0.2R^2$  となる。このことにより,  $\alpha \geq 2$  となる。

すべてのディスカバリー状態のノードがカウントする時間  $T_d$  の合計を  $T_{d-ALL}$  とする。また,  $B$  をノード密度とする GAF における時間  $N^2T$  あたりのネットワーク全体の消費電力  $P_{ALL-GAF}N^2T$  は, アクティブノードおよびディスカバリーノードの消費電力の合計となる。したがって, ネットワーク全体のアクティブノード数  $S_{ALL}/S_{GAF}$ , および全ノード数  $BS_{ALL}$  ( $B$  はノード密度) を用いて表すと,

$$P_{ALL-GAF}N^2T = \frac{S_{ALL}}{S_{GAF}}P_{active}N^2T + BS_{ALL}P_{discovery}T_{d-ALL}$$

となる。また, HGAF における時間  $N^2T$  あたりの消費電力も同様にアクティブノードおよびディスカバリーノードの消費電力の合計となるので,

$$P_{ALL-HGAF}N^2T = \frac{S_{ALL}}{\alpha S_{GAF}}P_{active}N^2T + BS_{ALL}P_{discovery}T_{d-ALL}$$

と表すことができる。よって, GAF と HGAF との時間  $N^2T$  あたりの消費電力の差は

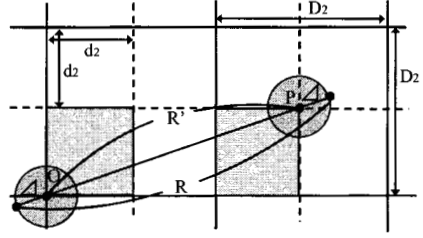


図 13 セル 4 分割における位置情報誤差の影響

$$P_{ALL-GAF}N^2T - P_{ALL-HGAF}N^2T = (\alpha - 1) \frac{S_{ALL}}{S_{GAF}}P_{active}N^2T$$

となる。定義より  $\alpha \geq 2$  であるので,

$$P_{ALL-GAF}N^2T - P_{ALL-HGAF}N^2T \geq \frac{S_{ALL}}{S_{GAF}}P_{active}N^2T$$

上式より, HGAF は常に GAF よりも消費電力を抑えられことがいえる。

#### 4.2 位置情報誤差の影響

HGAF および GAF は位置情報に誤差がある場合ではすべてのアクティブノード間の通信が保障されない。そこで, 位置情報の誤差を許容可能なように拡張する。

HGAF および GAF のセル面積を比較する。HGAF では隣り合うセルにおけるすべてのアクティブノード同士が通信できるようにさせるため, 通信可能最大半径  $R$  を最大限利用しセルの一辺の長さを決定した。このため, 取得した位置情報に誤差が生じた場合には実際のノード間の距離が通信可能最大半径  $R$  以上になることがあり, アクティブノード間の通信を保障できない。そこで, 位置情報の誤差を考慮した場合における GAF, HGAF および拡張 HGAF のセル面積の変化を調べた。

隣り合うアクティブセル間の最長距離を  $R'$ , 位置情報の最大誤差を  $\Delta$  とすると, 位置情報誤差を許容する最長アクティブセル間距離は  $R' + 2\Delta$  となる (図 13)。これを通信可能最大半径  $R$  以下にする必要があるので,

$$R' + 2\Delta \leq R$$

が満たされる必要がある。これをもとにセル面積  $S_N$  を算出すると,

$$S_N \leq \frac{N^2}{(N+1)^2 + 1} (R' + 2\Delta)^2$$

となる。

上式より算出された GAF, HGAF (4 分割), 拡張 HGAF (9 分割) における位置情報誤差を許容した場合の面積変化を図 14 に示す。同図より, GAF, HGAF (4 分割), 拡張 HGAF (9 分割) のすべてにおいて位置情報誤差が大きくなるほど同じ割合でセル面積を小さくし

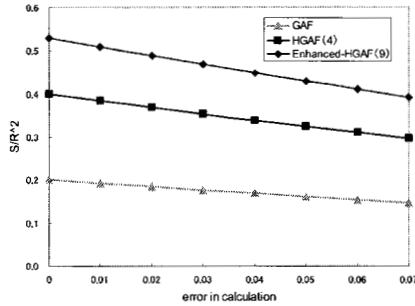


図 14 位置情報誤差を考慮した場合のセル面積変化

なければならないことが分かる。

## 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である HGAF および拡張 HGAF を提案した。

ノードが一樣に分布された場合において両提案方式は GAF よりもアクティブノードを減らすことできる。それにより両提案方式は GAF よりもある単位時間当たりの消費電力を抑えることができる。また、位置情報誤差がある場合における両提案方式および GAF のセル面積の比較の結果、両提案方式と GAF は同様の傾向があることが分かった。このことにより、位置情報誤差がある場合においても消費電力の面では両提案方式に優位性があるといえる。

今後の課題として、シミュレーションによるノード配置にばらつきがある場合の両提案方式と GAF とのノード寿命の比較や、ノード移動が行われる場合の対処方法およびノード間における時刻同期の方法の検討などが挙げられる。

## 謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 A (18680008) および (財) 中島記念国際交流財団日本人若手研究者研究助成金の研究助成によるものである。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 (Mobi-

Com'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 the 7th International Conference on Mobile Data Management (MDM'06), 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-Chaung 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) Abtin Keshavarzian, Huang Lee and Lakshmi Venkatraman: "Wakeup Scheduling in Wireless Sensor Networks," in proc. of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'06), 2006.
- 8) Tian He, Chengdu Huang, Brian M. Blum, John A. Stankovic and Tarek Abdelzaher: "Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks," in proc. of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'03), 2003.
- 9) Jeremy Elson, Lewis Girod and Deborah Estrin: "Fine-grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," in proc. of the Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys2003), 2003.
- 10) JSeema Bandyopadhyay and Edward J. Coyle: "Minimizing communication costs in hierarchically-clustered networks of wireless sensors," Computer Networks Vol. 44, pp. 1-16, 2004.