

## データセントリックセンサネットワークにおけるルーティング方式の検討

佐藤雄亮<sup>1</sup> 油田健太郎<sup>2</sup> 岡崎直宣<sup>3</sup> 富田重幸<sup>3</sup> 朴美娘<sup>4</sup>

1 宮崎大学大学院工学研究科 2 熊本県立大学総合管理学部

3 宮崎大学工学部 4 三菱電機㈱ 情報技術総合研究所

E-mail: tge717u@student.miyazaki-u.ac.jp

あらまし バッテリ駆動のセンサ端末で構成されるセンサネットワークでは、省電力化が重要な課題となる。特に、通信は最もエネルギー消費の高い動作だと言われており、通信量を抑制することは、電力資源が乏しいセンサネットワークにとって有効である。そこで、本論文では通信量を増加させずに、かつ位置情報を必要としない簡易なルーティング方式である HVGF (Hop-Vector based Greedy Forwarding) を提案する。提案方式では、 $n$  個の基準点を設け、基準点からのホップ数を要素とするベクトルを全てのノードに作成し、その  $n$  次元ベクトル間の距離に基づいてグリーディーフォワーディングを行う。シミュレーションによる評価を行い、既存の正確な位置情報を用いる手法に比べノード密度が低い場合や、ノードの分布に偏りがある場合のネットワークにおいて有効な結果が得られた。

キーワード センサネットワーク、ルーティング、データセントリックストレージ

### A new routing protocol for data-centric sensor networks

Yusuke SATO<sup>1</sup> Kentaro ABURADA<sup>2</sup> Naonobu OKAZAKI<sup>3</sup> Shigeyuki TOMITA<sup>3</sup>  
and Mi Rang PARK<sup>4</sup>

1 Graduate School of Engineering, University of Miyazaki

2 Faculty of Administration, Prefectural University of Kumamoto

3 Faculty of Engineering, University of Miyazaki

4 Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

E-mail: tge717u@student.miyazaki-u.ac.jp

**Abstract** For sensor networks consisting of battery-powered sensor nodes, power saving is significant challenge. It is effective to reduce the amount of communication for sensor networks where power resource is scarce, because sensor nodes consume energy most in communication. We propose a routing protocol, HVGF (Hop-Vector based Greedy Forwarding), which reduces the amount of communication and doesn't need geographic information. In this method, we introduce  $n$  base points, and assign  $n$ -dimensional hop-vector consist of number of hops from each base point to each nodes. Then, each node forwards packets greedily based on distance between hop-vectors of the node and destination. The simulation results show that HVGF works well in the low density network or network which contains a large void in the center compared to existing greedy forwarding method using information of real geographical position.

**Keyword** Sensor networks, Routing, Data-centric storage

#### 1. はじめに

近年、モバイル通信の分野において、無線移動端末などをを用いて固定のインフラがない場所にネットワークを構築するモバイルアドホックネットワークの研究が行われている。中でも「いつでも、どこでも、誰でも、何でも」社会の至るところでネットワークにつながり、情報の自在なやりとりが可能になる「ユビキタスネットワーク」においてセンサネットワークは主要な役割を果たすことが期待されている。センサネットワークを構成するセンサノード（以下、ノード）は、小型軽量化、低コスト化が求められる。また、配置や移動の容易性を考慮するとバッテリーで駆動すると考えられるが、設置するノード数はネットワークサイズによって数千～数万になることもあり、バッテリーの交換や再充電は管理・コストの面から困難である。このことから、ノードの通信機能に対す

る要求条件は従来の通信に求められていた高データ伝送速度や高スループットではなく、省電力が求められる。特にセンサネットワークでは通信は最もエネルギー消費量の高い動作であり<sup>[1]</sup>、ルーティングにおいても通信量の少ない方式が求められる。これまで、地理的位置情報を用いることにより通信量を抑えたルーティング方式<sup>[2]</sup>が提案されているが、地理的位置情報を取得するためには、各ノードに特別なデバイスを付与する必要がある、ノードを低コスト化、小型軽量化する上で妨げとなるだけでなく、地理的位置情報を取得する際に電力を消費するという問題がある。したがって、通信量を抑制しつつ地理的位置情報を用いないルーティング方式がセンサネットワークにとって望ましい。センサネットワーク上にツリー状の経路を構築することで地理的位置情報を必要としないルーティング方式<sup>[4]</sup>も提案されているが、ツリーのル

ート付近は負荷が集中すると考えられる。そこで、ネットワーク全体の稼働可能期間を延ばすためには、一部のノードに通信の集中が起こらないようなルーティング方法が望まれる。本論文ではセンサネットワークにおいて地理的位置情報を用いることなく既存の地理的位置情報を用いた手法と同程度に通信量を抑え、かつ一部のノードに通信の集中が起こらないルーティング方式、HVGf (Hop-Vector based Greedy forwarding)を提案する。提案手法では $n$ 個の基準点を設け、基準点からのホップ数を要素とするようなベクトルを全ノードに作成し、その $n$ 次元ベクトル間の距離に基づいてグリーディーフォワーディング (以下、GF) を行う。地理的位置情報を用いないことで、各ノードにGPS受信モジュールなどを備える必要がなく、より小型軽量化、低コスト化、省電力化が可能となる。

## 2. 関連研究

ここではセンサネットワークにおける既存のルーティング方式を、GPSなどにより取得した地理的位置情報を用いる手法と地理的位置情報を必要としない手法に分けて整理する。

地理的位置情報を用いるルーティング方式<sup>[2]</sup>では地理的位置情報が取得できることを前提としている。しかし、現時点で屋外・屋内・地下を問わず利用でき、低コストで精度の良い測定が行える手法はまだ確立されていない<sup>[3]</sup>。しかも、地理的位置情報を取得するためには、各ノードに特別なデバイスを付与する必要がある。これは、ノードを低コスト化、小型軽量化する上でネックになる。さらに、地理的位置情報を取得する際にも電力を消費してしまう。そこで、地理的位置情報を必要としないルーティング方式も提案されている<sup>[4]</sup>。

[4]ではツリー状の経路を用いて、各ノードにサブツリーの大きさに比例した範囲の値 (以下、ラベル) を割り当てる。そのラベルはツリーの横方向に値が単調増加 (または単調減少) するように割り振られる。ルーティングの際は、あて先ノードが共通のサブツリーとなるようなノードを経由して転送される。ここで、ルートからのホップ数 (深さ) が同じノード同士がリンクを構築し、横方向への転送を可能にすることで、ルート付近のノードへの負荷の集中を緩和するとともに、あて先までのホップ数を削減する工夫を行っている。ラベル作成時に必要な情報量・通信回数が少ないのでエネルギーコストは低いという利点があるが、2点を基準とするホップ数から各ノードの位置を求めているため、十分な精度が得られず、結果的にルート付近のノードへ負荷が集中するケースが多いと考えられる。

センサネットワークに限定せず、一般のアドホックネットワークを対象とした地理的位置情報を必要としないルーティング方式として[5]がある。[5]ではノード間のホップ数から求まる仮想的な位置 (virtual coordinate) を求め、その仮想的な位置情報を基にGFを行う。シミュレーションにより、パケット転送成功率において正確な座標を用いた場合と同程度の、または、空洞や障害物がある場合にはそれを上回る性能があることが示されている。しかし、仮想的な位置を求める過程で、通信や計算のオーバーヘッドが非常に大きいという課題があり、センサネットワークへの適用は現実的ではない。

## 3. 提案方式

本論文ではセンサネットワークにおいて地理的位置情報を用いることなく既存の地理的位置情報を用いた手法と同程度に通信量を抑え、かつ一部のノードに通信の集中が起こらないルーティング方式であるHVGfを提案する。

提案手法では $n$ 個 ( $n > 2$ ) の基準点を設け、全てのノードに基準点からのホップ数を要素とするベクトルを作成する。ここで、ルーティングの精度を上げるために、基準点をそれぞれが互いになるべく離れるように指定する必要がある。そこで、基準点をネットワークの周辺に配置されているノード (以下、周辺ノード) の中から選択することとした。そのため、まず周辺ノードを判別し、それらの中からそれぞれができるだけ離れるように $n$ 個の基準点を選択する。そして、基準点からのホップ数を要素とするベクトルを全てのノードに作成し、その $n$ 次元ベクトルをアドレスとして用いたGFを行う。ここで、GFとは、各ノードが隣接ノードの情報を保持しており、自分の隣接ノードの中で一番あて先に近いノードへ転送することをあて先に届くまで繰り返す転送方法<sup>[2]</sup>のことである。

以下に、提案手法の詳細を述べる。まず、3.1.で対象とするセンサネットワークを計画配置ネットワークと一般配置ネットワークに分類し、3.2.から3.4.でルーティングの基準になる各ノードのアドレスの作成方法について述べる。次に3.5.で計画配置ネットワークにおいて、あて先ノードが一意に指定されることを前提とした場合のルーティング手法について提案する。さらに3.6.で、一般的なネットワークに適用するための拡張について述べる。

### 3.1. 対象とするセンサネットワーク

センサネットワークは取得したセンシングデータの格納場所により、主にExternal Storage, Local Storage, Data-Centric Storage (以下、DCS) の3つに分類される。本提案手法はDCSを対象とした、任意の2点間の転送 (ルーティング) について考察する。ここでDCSとは、センシングデータの属性に基づきデータの格納場所を決める方法である。ネットワークをセンシングデータの属性数に分割し、分割された区画に属性を対応付け、区画ごとにデータを保存するノードを配置する。各ノードでデータが発生すると、その属性に対応するノードをあて先としてデータを転送する。ノードが属性に1対1に対応するように規則正しく配置されている場合 (以下、計画配置ネットワーク) には、属性ごとにデータを保持するノードが一意に決まる。一方、属性に対応する区画とは独立にノードの配置が行われた場合 (以下、一般配置ネットワーク) は、その属性のデータを保存するノードを一意に決定する手段が必要となる。

### 3.2. 周辺ノード判定

ここでは各ノードが自律的に自分が周辺ノードであるかどうかを判定する手順を述べる。

ネットワークの中心付近のノード1つをブートストラップノード (以下、BN) に指定し、そのノードはネットワーク内にHELLOメッセージをブロードキャストする。このHELLOメッセージには、ノードを1つ経由することに値が1加算されるカウンタが含まれており、全てのノードはBNまでのホップ数を知ることができる。各ノードは自分が周辺ノードで

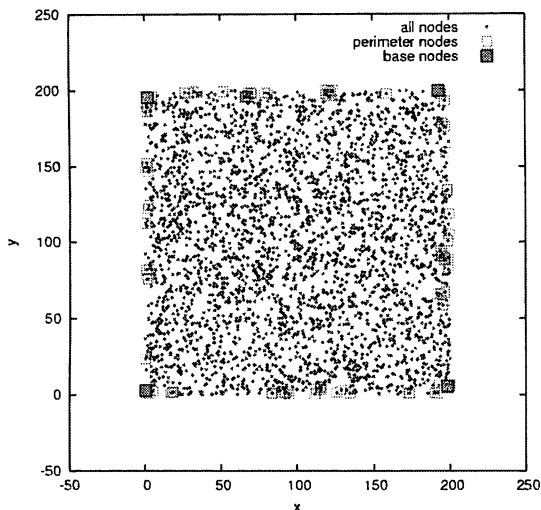


図 1 正方形フィールドに適用した例

あるか判断するために、2 ホップ以内のノードの中で自分より BN から遠いノードがないかを調べ、ない場合は自発的に周辺ノードとなる。

### 3.3. 基準点の選択

3.2.で判別した周辺ノードの中から、基準点をそれぞれが離れるように選択する。以下に基準点選択手順を示し、適用例を図 1 に示す。

#### 【基準点の選択手順】

- 1) 全ての周辺ノードにランダムな値のタイマをセットする。  
ランダムな値の決め方は、BN から遠いノードがより短い待ち時間になるように乱数の上限値を変化させる。このようにすることによって、ネットワークの縁に近いノードのタイマの値を短く設定することができる。
- 2) このタイマを一番初めにタイムアウトしたノードが基準点となる。
- 3) 基準点の数が  $n$  個になった場合、基準点の選出を終了する。
- 4) 基準点の数が  $n$  個未満の場合、基準点となったノードは、自身の ID を HELLO メッセージに含めてネットワーク内にブロードキャストする。

この HELLO メッセージには、ノードを 1 つ経由することによって値が 1 加算されるカウンタが含まれている。これにより、HELLO メッセージを受け取ったノードは、基準点までのホップ数  $h_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) を知る。

- 5) 基準点になったノード以外の周辺ノードにランダムな値のタイマをセットし、2)の処理に戻る。

このときのランダムな値の決め方は、既に選ばれている基準点からのホップ数  $h_1 \dots h_n$  を使用し、より離れているノードほど乱数の上限値が短くなるタイマのセットをする。なお、ここでセットするタイマの値は、基準点からの HELLO メッセージのブロードキャストがネットワーク全体に伝わった後にタイムアウトするように設定する必要がある。

### 3.4. $n$ 次元ベクトル作成

各ノードに  $n$  個の基準点からのホップ数を要素とする  $n$  次元ベクトルを作成する手順について述べる。

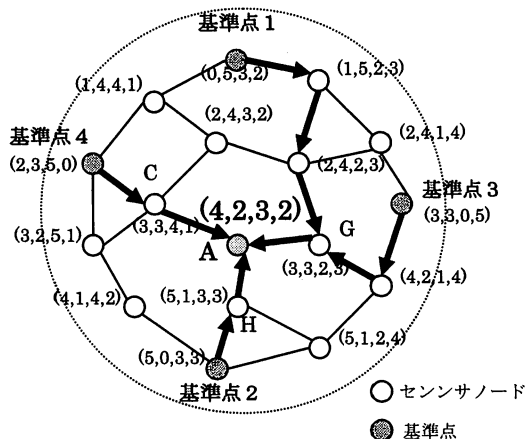


図 2  $n$ 次元ベクトル作成例 ( $n=4$  の場合)

Node ID	Address
C	(3,3,4,1)
G	(3,3,2,3)
H	(5,1,3,3)

表 1 ノード A のアドレステーブル

各ノードは 3.3 節で選択された基準点からブロードキャストされた HELLO メッセージを受信することで、各基準点からのホップ数を知りこれをベクトルとして保持する。

基準点の数を  $n$  とすると、ノード  $j$  のベクトル  $\vec{v}_j$  は

$$\vec{v}_j = (h_1^j \dots h_n^j)^T$$

と表される。この  $n$  次元ベクトルは基準点や周辺ノードを含め、全てのノードに作成する。以下、本論文では各ノードのアドレスを表す  $n$  次元ベクトルを単に「アドレス」と呼ぶ。図 2 に  $n=4$  のときの例を示す。

全てのノードがアドレスを作成し終える ( $n$  番目の基準点からの HELLO メッセージがネットワーク全体に伝わると) と各ノードは自分のアドレスを自分の通信範囲内にいるノード (隣接ノード) だけにブロードキャストする。これにより、各ノードは隣接ノードのアドレス情報 (ルーティングテーブル) を得ることができる。表 1 に図 2 中のノード A のルーティングテーブルを示す。

ここで、2 つのノードが「隣接している」とは互いの通信範囲内に入っており、双方向のリンクでつながっている状態と定義し、互いに隣接しているノードを他方の「隣接ノード」と呼ぶ。

### 3.5. B-HVGF

本節では、3.4 節で各ノードが作成したルーティングテーブルに基づいて GF によりルーティングを行う B-HVGF (Basic-HVGF) について述べる。この手法は計画配置ネットワークを対象とし、宛先アドレスが与えられたときにデータを保持すべきノードが一意に決まる場合を想定した手法である。

本論文では、送信されるパケットのヘッダにはあて先アドレスが含まれている。さらに、各ノードはノード ID により一意に識別できるものとする。

各ノードは自分のルーティングテーブルを基に隣接ノードの中であて先アドレスが一番近いアドレス（距離が小さい）のノードにパケットを転送する。それを受信したノードは同様に、自分の隣接ノードの中で一番あて先アドレスと近いアドレスを持つノードに転送する。この動作をあて先に届くまで繰り返す。転送の途中で、自分があて先が一番近いノードとなった場合、転送を停止しデータを保持する。

ここで  $\vec{v}_k$  と  $\vec{v}_l$  の間の距離  $D(\vec{v}_k, \vec{v}_l)$  はベクトル  $\vec{v}_k = (\vec{v}_k - \vec{v}_l)$  のノルムとして定義する。

$$D(\vec{v}_k, \vec{v}_l) = \|\vec{v}_k\|_p = \left( \sum_{i=1}^n |h_i^k - h_i^l|^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

#### [ 記号の定義 ]

$V$  : ノードの集合

$R \subseteq V \times V$  : 隣接しているノード間の関係

$N_x = \{y | (x, y) \in R, y \in V\}$  : ノード  $x$  の隣接ノードの集合

$\vec{v}_d$  : あて先アドレス

$\vec{v}_x$  : ノード  $x$  のアドレス

#### [ B-HVGF 手順 ]

- 1) あて先アドレスを指定されたノード  $s$  はそのアドレスが自分のアドレスと一致するかどうか比較する。
- 2) 一致した場合、データを保持する。
- 3) 一致しない場合、ノード  $s$  は全てのノード  $y \in N_s$  のアドレス  $\vec{v}_y$  とあて先アドレス  $\vec{v}_d$  との距離  $D(\vec{v}_d, \vec{v}_y)$  を計算する。
- 4) ノード  $s$  は  $D(\vec{v}_d, \vec{v}_{y_k}) = \min_{y_i \in N_s} \{D(\vec{v}_d, \vec{v}_{y_i})\}$  かつ  $D(\vec{v}_d, \vec{v}_{y_k}) > D(\vec{v}_d, \vec{v}_{y_l})$  なるノード  $y_k$  が存在するか調べる。
- 5)  $y_k$  が存在しなかった場合には転送を停止し、データを保持する。
- 6)  $y_k$  が存在した場合には  $y_k$  へデータを転送する。
- 7) ノード  $s$  からデータを受け取ったノード  $y_k$  はあて先アドレスと自分のアドレスを比較し、以降、2) から 7) を繰り返す。

### 3.6. 一般配置ネットワークへの適用

次に、属性に対応する区画とは独立にセンサの配置が行われた場合に適用するために B-HVGF を拡張する。計画配置ネットワークでは属性ごとにデータを保存すべきノードが一意に決定する。これに対し、一般にはノードの配置とネットワークの分割が必ずしも対応するわけではない。そのような場合に DCS に対応するためには、以下の3つの点について考慮する必要がある。

#### 3.6.1. アドレス決定

上述のように、計画配置ネットワークでは属性ごとにデータを保存すべきノードが一意に決定するため、このノードのアドレスをあて先アドレスとして用いることができる。しかし、ノードの配置とネットワークの分割が対応しない場合には、1つのノードのアドレスをその区画を表すアドレスとして使用できない。そのため、それぞれの区画に対して、その区画を表す1つのアドレスを決める必要がある。そこで、ここでは、仮に配置した基準点（以下、仮基準点）から各区画までのホップ数の概算を、ネットワークサイズ、ノード密度、各ノードの通信範囲より求め、それらを要素とする  $n$  次元ベクトルをその区画を示すアドレスとする。

#### 3.6.2. データを保存するノードの決定

一般に前述のように定めたアドレスとノードとは1対1に

対応しない。すなわち、必ずしも指定されたアドレスを持つノードが存在するとは限らず、反対に複数のノードが同じアドレスを持つ場合もありうる。

そのような場合でも前述のように定めたアドレスをあて先として指定したときに、データを保存すべきノード（以下、担当ノード）を一意に決定する必要がある。なぜならば、本来なら1つのノードに保存されるべきデータが複数のノードに分散して保存された場合、観察者からその属性にクエリが送られたときに、その属性の全てのデータを取得することができなくなるからである。また、クエリ自体が担当ノードに届かない場合も考えられる。

そこで、ここでは、あて先として指定されたアドレスを持つノードが存在しない場合には、あて先として指定されたアドレスと一番近いアドレスを持つノードを担当ノードとする。ここで、その候補が複数ある場合には、ノードIDが一番若いものを担当ノードとする。また、あて先として指定されたアドレスを持つノードそのものが複数存在する場合には、ノードIDが一番若いノードを担当ノードとする。

#### 3.6.3. 保存先ノードへのデータ転送

対応付けられた属性の担当ノードがその属性のデータを全て保持するためには、担当ノードあてに転送されたセンシングデータが担当ノードまで必ず到達する必要がある。なぜなら、担当ノードをあて先として転送されたときに、途中で転送が停止した場合、その停止したノードにデータが保存されてしまうからである。

センシングデータやクエリがそのデータの属性に割り当てられた担当ノードに到達することを完全に保障するためには、転送が停止した際に、そのノードは他の全てのノードに、よりあて先アドレスに近いアドレスをもつノードがないか、問い合わせれば良い。しかし、このことは、通信量、消費電力の増加を招く。これは、電力資源が少ないセンサネットワークでは大きな問題となる。

そこで、ここでは探索時のクエリの送信を1ホップに限ることで、通信量、消費電力を軽減した最近接ノード探索手法を提案する。最近接ノード探索手法では2ホップ先の隣接ノードに、転送が停止したノードよりあて先に近いノードが存在しないかどうかを問い合わせ、存在した場合にはその中で一番近いノードに転送する。存在しない場合には転送を停止し、そのデータを保持する。この手法はセンシングデータやクエリが必ず担当ノードに到達することを保障しているわけではないが、実用的な精度で探索できると考える。この最近接ノード探索手法を B-HVGF に適用した手法を HVGF と呼ぶ。

## 4. 評価

提案手法を評価するためにシミュレーションを行い、提案手法である B-HVGF と HVGF、既存の実際の地理的位置情報を用いた GF（以下、TPGF (True Position Greedy Forwarding)）の3つを比較した。表2にシミュレーション環境を示す。

以下の評価では、属性に対応する領域として  $m \times m$  の格子状に分割した区画を考える。図3は  $m=10$  の場合を示す。同図において  $A' \sim D'$  は仮基準点を表す。計画配置ネットワークでは、各区画の中心に1つのノードが存在し、隣の区画（斜め含む）のノードが互いに隣接しているものとする。

ネットワークサイズ		50m×50m - 350m×350m
センサノード数	4.2.2.	175 - 8575 個
	4.2.3.	164 - 8039 個
センサノードの通信範囲		8 m
基準点の数( $n$ )		4
シミュレーション回数		100 回×100 セット

表 2 シミュレーション環境

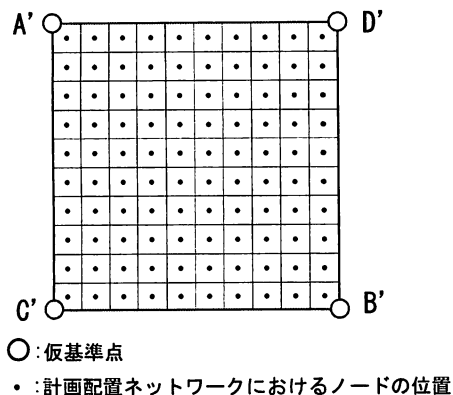


図 3 属性に対応付けられる区画

#### 4.1. 評価基準

本論文では、提案手法の評価に以下の二つの基準を用いる。

##### i) 成功率

ルーティングの際の経路構築の基本的な性能を表す指標として成功率を用いる。送信ノードから送られたパケットが担当ノードに到着した場合を成功とし、その割合を成功率と定義する。

TPGF では、あて先アドレスを 2 次元座標で指定する。ランダムにノードを配置する一般のネットワークでは、指定したあて先アドレスに一番近いノードが担当ノードとする。

B-HVGF, HVGF では、仮基準点から各区画の中心までのホップ数の概算をネットワークサイズやノード密度、通信範囲から求め、それらを要素とする 4 次元ベクトルであて先を指定する。ランダムにノードを配置する一般のネットワークでは、指定したアドレスと一番近いアドレスを持つノードを担当ノードとする。

なお、担当ノードの候補が複数ある場合は、ノード ID が一番若いものを担当ノードとする。

##### ii) 平均ホップ数

通信量の指標として平均ホップ数を用いる。ここで、送信ノードからあて先ノードまでに経由するノード数の平均値を平均ホップ数と定義する。

#### 4.2. シミュレーション結果

TPGF, B-HVGF, HVGF それぞれ、100 回異なる送信元から異なるあて先へ転送することを 1 セットとして、100 セットのシミュレーションを行い、その平均値を結果として用いた。なお、平均ホップ数は転送が成功した場合のみを計測した。

ここではまず、4.2.1. でアドレスとノードが 1 対 1 に対応する計画配置ネットワークにおける成功率と平均ホップ数につ

いての結果を述べる。4.2.2. では一般的なノード配置においてネットワークサイズやノード密度の観点から比較し、4.2.3 で中央に空洞があるネットワークの結果を述べる。

##### 4.2.1. 計画配置ネットワークにおける結果

330m×330m のネットワークにおいて、 $m=60$  としてシミュレーションを行った。その結果、TPGF, B-HVGF, HVGF のいずれも成功率は 100%、平均ホップ数は 27.9 ホップとなっている。この結果より、計画配置ネットワークにおいて提案手法は既存の地理的位置情報を用いる手法と同程度の性能を達成できているといえる。

##### 4.2.2. 一般のネットワークにおける結果

次に、ノードをランダムに配置してシミュレーションを行った。

図 4 はノード密度を固定(7 個/100  $m^2$ )し、ノード数を 175 から 8575 まで増加させたときの、それぞれの成功率を示している。同図よりノード数の増加に伴い、B-HVGF の成功率は TPGF に比べて大幅に低下している。これは、転送の途中で自分の隣接ノードの中によりあて先に近いノードが存在しない場合があるが、ネットワークサイズが大きくなるに従い、送信元とあて先の距離も長くなるため、自分よりあて先に近いノードが存在せず転送が停止する割合が増えたためだと考えられる。これに対し、HVGF の成功率は TPGF に比べてわずかに上まわっている。これは、自分の隣接ノードの中によりあて先に近いノードが存在しない場合でも最近接ノード探索手法を用いて 2 ホップ先まで問い合わせることで、よりあて先に近いノードを見つけることができたためだと考えられる。ネットワーク規模の拡大に伴う、HVGF の成功率の低下はわずかであり、大規模なネットワークに対して拡張性があると考えられる。また、最近接ノード探索手法を適用した HVGF は未適用の B-HVGF より成功率が高くなっており、最近接ノード探索手法の有効性が示された。

このときの平均ホップ数は TPGF に比べて HVGF は約 15% 増加している。これは、実際の地理的位置情報を用いた TPGF に比べて簡易なホップ数を用いている提案手法はルーティングの精度が低いためだと考えられる。

図 5 はノード密度の異なるネットワークにおける成功率の違いを示している。横軸は 100  $m^2$  あたりのノード数、縦軸は成功率を表している。同図より、8 個/100  $m^2$  より粗なネットワークでの HVGF の成功率は、TPGF に比べて高い値となっている。これは、比較的粗なネットワークでは提案手法の方がネットワークトポロジをより反映しているからだと考えられる。これに対し、8 個/100  $m^2$  より密なネットワークでは、TPGF が 100% に近づいているのに対し、HVGF は 93% 程度にとどまっている。これは、既存方式が正確な地理的位置情報を用いているのに対し、提案方式はホップ数を用いた簡易な方式であるため、既存方式ほどの精度が得られないためだと考えられる。

成功率がほぼ同じになった 8 個/100  $m^2$  のネットワークにおいて HVGF の平均ホップ数は既存手法の TPGF に対して約 14% 程度増加している。また、B-HVGF, HVGF の平均ホップ数はノード密度にかかわらずほぼ一定であり、ノード密度に対する拡張性があると考えられる。

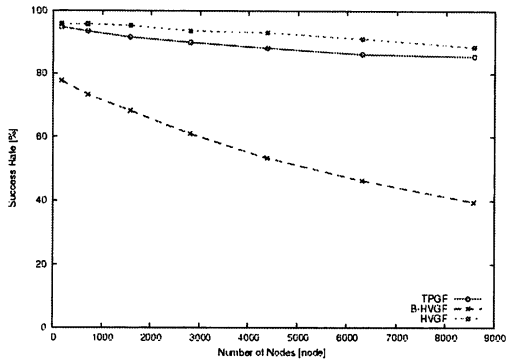


図 4 ネットワークサイズと成功率

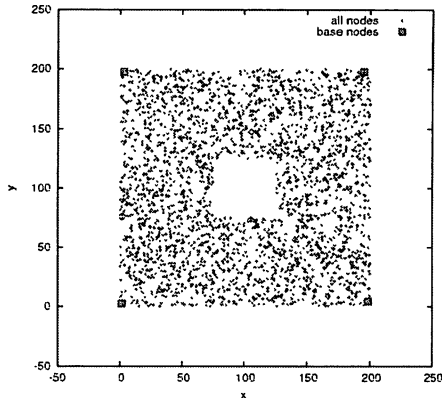


図 6 空洞のあるネットワーク

#### 4.2.3. 空洞のあるネットワークにおける結果

ネットワークの中央に面積の1/16の大きさの空洞がある場合のシミュレーションを行った。また、このシミュレーションでは基準点を理想的な位置に指定した。図6にノード数2625の例を示す。

図7はノード密度を固定(7個/100m<sup>2</sup>)し、ノード数を164から8039まで増加させたときの成功率を示している。同図よりHVGFの成功率はTPGFに比べ全てのネットワークサイズにおいて上まわり、ネットワークの規模によっては20%以上良い結果となっている。また、ネットワーク規模の拡大に伴う成功率の低下は緩やかであり、拡張性があるといえる。

このときのHVGFの平均ホップ数はTPGFに比べ増加したが、これはHVGFのほうがより遠くのあて先ノードへの転送が成功しているためだと考えられる。

以上より、提案手法はノード密度が低いネットワークやノードの分布に偏りのあるネットワークに適した手法であることが分かる。また、ノード密度が高いネットワークでの成功率は十数%低下するものの、GPSなどを用いる必要がないため、センサネットワークにおいては有効性が高いと考えられる。

#### 5. まとめ

本論文ではセンサネットワークにおけるホップ数に基づくルーティング方式を提案し評価した。提案手法は地理的位置情報を用いる代わりにネットワークの周辺に $n$ 個の基準点を

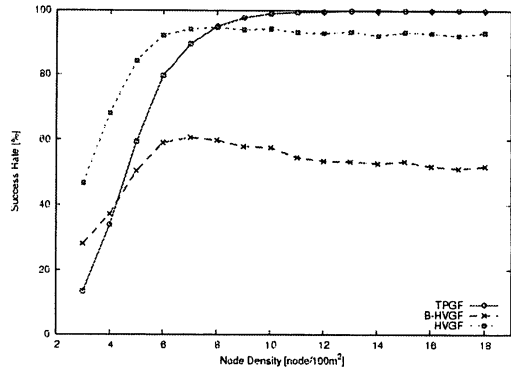


図 5 ノード密度と成功率

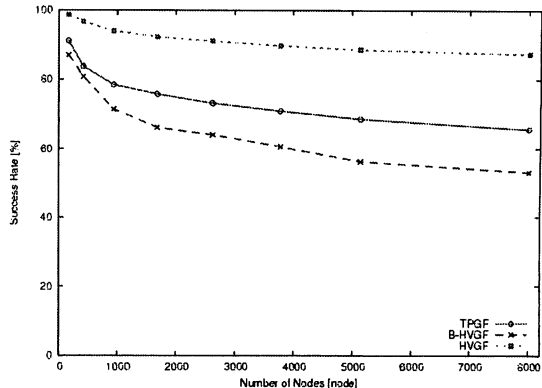


図 7 空洞のあるネットワークにおける成功率

設け、基準点からのホップ数を要素とするベクトルを全ノードに作成し、 $n$ 次元ベクトル間の距離に基づいてGFを行う。

シミュレーションにより、既存の地理的位置情報を用いるGFに比べ、ノード密度が低いネットワークやノードの分布に偏りのあるネットワークにおいて有効なことが分かった。

今後は、障害物のあるネットワークでのシミュレーションやより厳密な通信量の比較を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] 安藤 繁, 田村 陽介, 戸辺 義人, 南 正輝, “センサネットワーク技術 ユビキタス情報環境に向けて,” 東京電機大学出版局, May 2005.
- [2] Brad Karp and H.T.Kung, “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,” Proc. MobiCom 2000, pp.243-254, August 2000.
- [3] 小野 昌之, 福井 潔, 柳原 健太郎, 福永 茂, 原 晋介, 北山 研一, “無線を使った位置検出,” 沖テクニカルレビュー, 第204号, Vol.72, No.4, pp.24-27, October 2005.
- [4] James Newsome and Dawn Song, “GEM: Graph Embedding for Routing and Data-Centric Storage in Sensor Networks Without Geographic Information,” Proc. ACM SenSys, pp.76-88, November 2003.
- [5] Ananth Rao, Sylvis Ratnasamy, Christos Papadimitriou, Scott Shenker and Ion stoica, “Geographic Routing without Location Information,” Proc. MobiCom 2003, pp.96-108, September 2003.
- [6] 守田 可南子, 佐藤 雄亮, 岡崎 直宣, 朴 美娘, “センサネットワークにおける位置情報を用いないルーティング方式の検討,” 情報処理学会 研究報告, Vol.2007-DBS-141, pp.171-178, January 2007.