

# 移動型センサネットワークにおける プッシュ型放送を用いたノード移動 制御手法に関する評価

Evaluation of a Node Movement Control Method using Push-based Broadcast in Mobile Sensor Networks

新城 達也<sup>♥</sup> 北島 信哉<sup>♥</sup>  
小川 剛史<sup>♦</sup> 原 隆浩<sup>♦</sup>  
西尾 章治郎<sup>▲</sup>

Tatsuya SHINJO Shinya KITAJIMA  
Takefumi OGAWA Takahiro HARA  
Shojiro NISHIO

近年、無線通信機能を備えたセンサで形成する移動型センサネットワークに関する研究が盛んに行われている。筆者らはこれまでに、プッシュ型放送とノード間通信を用いたノードの移動制御手法を提案している。提案手法では、各ノードが基地局へセンシングデータを収集する際に、基地局から放送される通信可能地点の情報を基に移動し、一時的にデータ収集用ネットワークを形成する。本論文では、提案手法についてシミュレーション実験による詳細な性能評価を行い、その有効性を確認した。

Recent advance in wireless communication technology has led to an increasing interest in mobile sensor networks. In our previous work, we proposed methods that control movement of sensor nodes by using push-based broadcast and communication among nodes. In these methods, nodes autonomously move based on the broadcast information on where they can communicate with the sink, and construct a temporal network to deliver their sensed data to the sink. In this paper, we show the results of simulation experiments regarding performance evaluation of our proposed methods.

## 1. はじめに

近年の無線通信デバイスの小型化、軽量化、高性能化およびロボティクス技術の発展により、センサノード（以下、ノードと呼ぶ）自身が移動して、センシングやネットワークを

<sup>♥</sup> 学生会員 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻

[shinjo.tatsuya.kitajima.shinya@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:shinjo.tatsuya.kitajima.shinya@ist.osaka-u.ac.jp)

<sup>♦</sup> 非会員 東京大学情報基盤センターキャンパスネットワーク研究部門 [ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp](mailto:ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp)

<sup>▲</sup> 正会員 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 [hara.nishio@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:hara.nishio@ist.osaka-u.ac.jp)

形成する移動型センサネットワークに関する研究が盛んに行われている[1, 2, 3].

移動型センサネットワークでは、ノードが移動することにより、広範囲のセンシングやセンサを直接設置することが困難な場所でのセンシングが可能となるため、広範囲での環境モニタリングや動植物の生体調査、建物内のセキュリティ管理、危険地域の調査などの応用が期待される。しかし、非常に広範囲の領域を限られた数のノードでセンシングしている場合、無線通信範囲に他のノードが存在しない状況が考えられ、センシングデータを基地局に収集するために、各ノードが基地局の無線通信範囲内まで移動することによって多大な電力を消費するという問題が生じる。

筆者らはこれまでに、移動型センサノードによって構成される疎なセンサネットワークにおける、ノードの移動制御手法としてSR方式を提案した[4]。SR方式では、プッシュ型放送配信を用いて、基地局とマルチホップ通信を行っているノードの位置を放送する。放送から得た情報を基にノードは自身に最も近いマルチホップ通信が可能な地点を動的に算出、移動し、一時的なネットワークを形成してデータ収集を行う。これにより、ノードが基地局の無線通信範囲まで直接移動する場合と比較して、移動距離が減少し、移動に要する電力を低減できることを確認した。一方、ネットワークを形成する際のノード間距離を広げることで、ノード全体の移動コストを低減できるが、無線の最大到達距離には達していないことが分かった。

そこで筆者らは、移動中に通信可能となったノード間で協調的に移動することで、ネットワーク形成時のノード間距離を広げ、ノードの移動コストを低減する、SR-N方式を提案した[5]。

本論文では、SR方式およびSR-N方式について、詳細なシミュレーション実験を行い、その有効性を検証する。特に、移動距離の削減のみに注目して、データを収集するネットワークを事前に静的に決定し、ノードが決められた地点に常に移動する手法と、動的にネットワークとの接続地点を決定して移動する提案手法の比較を行い、提案手法の利点および問題点について詳細に考察する。

## 2. 想定環境

本研究の想定環境を図1に示す。観測領域には1つの基地局と複数のセンサノードが存在する。領域中のノード密度は小さく、各ノードは基本的に隣り合うノードとは通信できない。基地局にはプッシュ型放送のための放送通信機能が備わっており、放送範囲は観測領域全体をカバーしているものとする。ノードはすべて移動型ノードとし、各ノードにおいて、

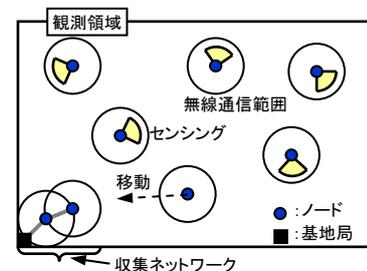


図1 想定環境

Fig.1 Assumed environment.

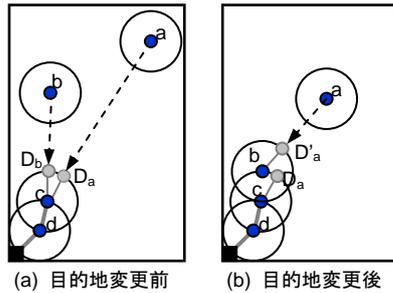


図2 SR方式  
Fig.2 The SR method.

基地局の位置と自身が担当するセンシング地点，全ノード数は既知で，自身の現在位置をリアルタイムに取得できるものとする。

ノードはまず担当するセンシング地点に配置され，センシングを行う．センシングを終えると，基地局と通信可能となる位置まで観測領域内を移動し，基地局にデータを転送する．基地局は全ノードに対し，基地局とマルチホップ通信をしているノードの位置を放送している．各ノードはデータ転送の際，放送内容に基づいて，マルチホップ通信が可能な最も近い位置に移動し，データ転送のためのネットワークを形成する．以降，このネットワークを収集ネットワークと呼ぶ．すべてのノードが収集ネットワークに参加した後，データ転送およびデータ中継を終えたノードから，センシング地点へ戻り，センシングを継続する．

簡単のため，ノードの追加や削除はなく，観測領域内に存在するノード数は一定とする．

### 3. 提案手法

本章では，SR および SR-N 方式の概要について述べる．

#### 3.1 SR(Shortest Route)方式

収集ネットワークを効率よく形成するために，収集ネットワークに参加しているノードの位置情報が観測領域全体に放送され，ノードはその情報に基づいて移動する．図 2(a)のように，センシングを終えたノード  $a, b$  は，放送される情報から，収集ネットワークに参加しているノードで最も近いノード  $c$  と通信可能な位置  $D_a, D_b$  を目的地として移動する．図中の点線矢印は移動経路を， $D_x$  はノード  $x$  の目的地を表す．

収集ネットワークに新しいノードが参加すると，放送データが更新される．図 2(b)のように，ノード  $b$  が新たに収集ネットワークに参加すると，ノード  $a$  はノード  $b$  が最も近いノードとなり，目的地を  $D_a$  から  $D'_a$  に変更する．このように，ノードはより移動距離が短くなるように目的地を変更しながら移動することで，消費電力を低減する．

#### 3.2 SR-N(Shortest Route with Negotiation)方式

SR-N 方式では，ノードが目的地に向かって移動している間に他のノードと通信可能となると，目的地情報を交換し，連携して収集ネットワークに参加する．これにより収集ネットワークへ参加する際の移動距離をさらに低減し，ノードの移動に要する電力の低減と，そのノードの後方から近づく他のノードの移動コストを削減できる．

以下，SR-N 方式におけるノードの動作を，単独ノード同士が出会った場合，既に他のノードと連携しているノード群と単独ノードが出会った場合について説明する．

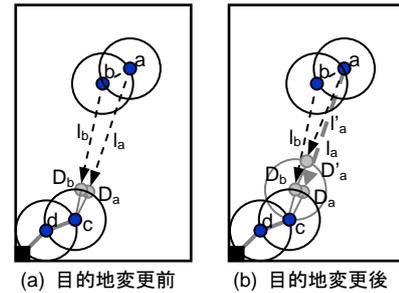


図3 単独ノード同士が出会った例  
Fig.3 Negotiation between single nodes.

#### 3.2.1 単独ノード同士が出会った場合

図 3 に，単独ノード同士が出会った場合のノードの動作例を示す．図中の  $l_x$  はノード  $x$  の目的地までの距離を表し，ノード  $a, b$  が収集ネットワーク内のノード  $c$  に接続しようとして移動しているときに，互いの通信範囲内まで接近した状況を示している．各ノードは，以下に示す手順で目的地を決定する．

- (1) 通信可能となったノード  $a, b$  は，現在の目的地である  $D_a, D_b$  の座標を互いに交換する．
- (2) 各ノードの現在位置と目的地までの移動距離  $l_a, l_b$  を計算し，移動距離の短いノードを長いノードの接続先候補とする．図 3 では， $l_a > l_b$  のため，ノード  $b$  がノード  $a$  の接続先候補となる．
- (3) ノード  $a$  は，ノード  $b$  に接続できる位置  $D'_a$  まで移動した場合の移動距離  $l'_a$  を求め， $l'_a < l_a$  ならば接続先をノード  $c$  からノード  $b$  に変更する．
- (4) 手順(2)でノード  $a$  が接続先をノード  $b$  に変更した場合には，ノード  $a$  はノード  $b$  に自身の接続先をノード  $b$  としたことと，その接続位置  $D'_a$  を伝える．
- (5) 以後，ノード  $b$  は目的地を変更するとノード  $a$  に新たな目的地を伝える．ノード  $a$  は受け取った情報を基に自身の目的地を修正し，放送による目的地の変更は行わない．

なお，同時に 3 台以上の単独ノードが通信可能となった場合には，目的地までの移動距離が短い順に目的地の変更が有効であるかを判断する．

以後，接続されるノードを親ノード，接続するノードを子ノードと呼ぶ．図 3 では，ノード  $a, b$  がそれぞれ子ノード，親ノードとなる．

#### 3.2.2 ノード群と単独ノードが出会った場合

図 4 にノード群( $a, b$ )とノード  $c$  が出会った場合の動作例を示す．ノード群内では，参加しているノードとその目的地に関する情報を共有するものとする．図 4 は，ノード  $b$  とノード  $c$  が通信可能となった状況である．SR-N 方式では，以下の手順に従い，新たに通信範囲に入ったノード同士が目的地を変更するかどうかを決定する．

- (1) ノード  $b, c$  間で，目的地の位置情報を交換する．このとき，ノード  $b$  は自身のノード群に所属するすべてのノード ( $a, b$ ) の目的地をノード  $c$  に伝える．
- (2) ノード  $b$  とノード  $c$  の現在の目的地までの移動距離を比較し，移動距離の長い方が目的地を変更すべきか決定する．図 4 ではノード  $b$  が接続先をノード  $c$  に変更した場合の移動距離を計算し，現在の目的地までの距離と比較した結果，ノード  $c$  に接続する位置を新たな目的地  $D'_b$  に変更している．
- (3) ノード  $b$  はノード  $c$  に子ノードとなったことと，目的

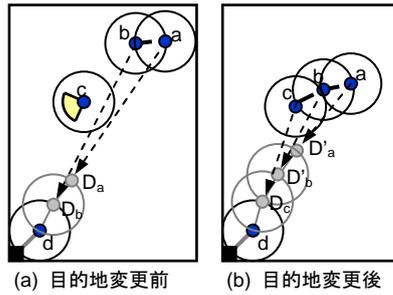


図4 ノード群と単独ノードが出会った例

Fig.4 Negotiation between node group and a single node.

地  $D_b$  を伝える。

(4) ノード  $b$  は子ノードであるノード  $a$  に新しい目的地  $D'_b$  を伝え、ノード  $a$  は目的地を  $D'_a$  に修正する。

子ノードであるノード  $a$  とノード  $c$  が通信可能となった場合にも同様に目的地の変更を検討する。このとき、ノード  $a$  が親ノードをノード  $b$  からノード  $c$  に変更した場合には、ノード  $a$  はその旨をノード  $b$  に伝える。親ノードは、子ノードの新しい目的地と通信できる位置に移動した方が移動距離が短くなるのであれば、目的地を変更し親子関係が逆転する。そうでない場合は、目的地を変更せず、親子関係を解消する。

ノード群同士が出会った場合も同様の方法でノードが目的地を変更する。

#### 4. 性能評価

シミュレーション実験により、SR-N 方式および SR 方式の性能評価を行った。実験では、静的距離優先方式との性能を比較した。静的距離優先方式については次節で説明する。

##### 4.1 静的距離優先方式

この手法では、ノードの移動コストをできるだけ削減することのみ焦点をあて、各ノードが収集ネットワークを形成するための自身の停止位置(1つ)を予め(静的に)決定し、常にその位置(以降、停止位置とよぶ)でデータ送信を行う。以下で、停止位置の決定方法について説明する。なお、この手法は、各ノードのセンシング地点が変更せず、ノードの障害も発生しないような安定性の高い環境にのみ適用可能である。

- (1) 各ノードを与えられたセンシング地点に配置する。
- (2) 各ノードは、現在の収集ネットワーク(基地局含む)までの最短距離および接続位置を算出する。ただし、算出した接続位置がノードにとって基地局から離れる位置の場合、その次に短い位置を算出する。これにより、ノードは常に基地局に近づく方向に移動する。
- (3) 手順(2)により算出した最短距離をノードごとに比較し、最も短いノードを計算により求めた接続位置まで移動させ、収集ネットワークに追加する。この位置がこのノードの停止位置となる。
- (4) すべてのノードが収集ネットワークに参加するまで、手順(2)、(3)を繰り返す。

##### 4.2 シミュレーション環境

シミュレーションで用いたパラメータを表1に示す。観測領域は2次元平面とし、基地局を領域の一角に配置した。各ノードのセンシング地点はランダムに割り当て、変更しないこととした。センシング地点をノードの初期位置とし、ノ

表1 パラメータ  
Table 1 Parameters.

パラメータ	値
領域の大きさ	2,000[m] × 2,000[m]
ノード数	400
ノードの移動速度	1[m/s]
無線通信範囲	50[m]
通信速度	2[Mbps]
移動コスト	1[J/m]
シミュレーション時間	30,000[秒]

ドはシミュレーション開始と同時にセンシングを開始する。各ノードは1回のセンシングに1,000秒を要し、この間に5Mbitのデータを収集した後、データ転送を開始する。ノードの移動コストを1J/mとし、データの送信、および受信コストを、それぞれ以下に示す式(1)および式(2)によりモデル化した。

$$(k \cdot 50) + (0.1 \cdot k \cdot d^2) \text{ [nJ]} \dots (1)$$

$$k \cdot 50 \text{ [nJ]} \dots (2)$$

$k$ [bit]は送受信データ量、 $d$ [m]は送信距離を表す。1回のセンシングデータを50m離れたノードに送信する場合、送信コストは1.5Jとなる。なお、移動コストは文献[6]、送信コストおよび受信コストは文献[7]に示されるモデルを適用し、移動、およびセンシングデータの送受信以外の動作に要するコストは非常に小さいものとして無視した。また、ノードは、データの送信と受信を同時に行えるものとし、電波衝突による遅延や、通信エラーはないものとする。

なお、 $S$ [Mbps]の速度でデータ送信を行っているノードに対して、 $m$ 個のノード  $n_i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) が同時にデータ転送を行う場合、ノード  $n_i$  の通信速度は  $S/m$ [Mbps] に制限されるものとした。実験では、ノードのセンシング地点を変更し、同様のシミュレーションを10回行った。

以上の環境において、次の5つの評価項目を用いて各手法における性能を比較・評価した。

##### ・平均コスト

ノード1台あたりの、移動コスト、送信コスト、および受信コストの平均の総和。

##### ・平均所要時間

シミュレーション中におけるノード1台あたりのセンシング時間、移動時間、通信時間、および待機時間の平均。通信時間はデータを転送した時間である。ここで、待機時間は収集ネットワークに接続しているがデータ転送を行っていない時間を表し、提案手法、静的距離優先方式では、ある一定の場所に停止し、接続しているノードが収集ネットワークに参加するのを待っている時間も含み、この時間を非接続待機時間と呼ぶ。

##### ・スループット

基地局が取得した単位時間あたりのデータ量。

##### ・平均通信距離

収集ネットワーク形成時の、各ノードにおけるデータ転送先までの通信距離(m)の平均。

##### ・平均ホップ数

収集ネットワーク形成時の、各ノードにおける基地局までのホップ数の平均。

さらに、SR-N方式の性能を詳細に評価するために、SR-N方式で形成されるノード群について以下の6項目について評価する。

・ノード群サイズ

収集ネットワークに接続した時に形成されていたノード群の大きさ(ノード数)と、その大きさのノード群が形成された割合。

・ノード群通信距離

ノード群に参加する各ノードの平均通信距離。

・ノード群初対面時通信距離

ノード群の各ノードが初めてノード群に加わったときの、そのノードとノード群の通信距離。

・ノード群センシング直後参加率

ノード群の各ノードがノード群に加わったのが、センシング終了直後であった割合。

・通信距離内訳

ノード群通信距離を、50m, 45m~50m, 40m~45m, 35m~40m, 30m~35m, 30m 以下、の6つに分類したそれぞれの割合。

・急停止率

ノード群内で、ノードが算出していた目的地に到着する前に収集ネットワークに接続したノードの割合。

4.3 評価結果

平均コスト、平均所要時間、および、スループット、平均通信距離、平均ホップ数をそれぞれ、表2, 3, 4に示す。

4.3.1 各手法の比較

SR-N方式では、SR方式と比較して、移動時間、待機時間、移動コスト、平均ホップ数が減少し、センシング時間、スループットが増加しているが、通信時間、送信コストが増加している。一方、静的距離優先方式では、SR-N方式と比較して、移動コスト、センシング時間、移動時間、スループットが減少し、送信コスト、受信コスト、通信時間、待機時間、ホップ数が増加している。

移動に関する評価として、移動コストおよび平均通信距離について考察する。SR-N方式では、ノード同士が目的地情報を交換し、移動距離が短くなるように目的地を変更することで、収集ネットワークに参加するまでの移動距離の合計が減少すると同時に、ノード同士が近づき過ぎないように移動する。そのため、SR方式より移動コストが減少し、平均通信距離が増加する。静的距離優先方式では、ノードの移動距離が短く、ノード間距離が最大通信距離になるように停止位置を決定しているため、最も移動コストが低く、平均通信距離が長い。

データ転送に関する評価として、送信コスト、受信コスト、スループットおよび平均ホップ数について考察する。表1, 3から、SR-N方式では、SR方式よりも、送信コスト、平均通信距離および、スループットが増加している。通信距離の増加による送信コストの増加は約2%だが、スループットも約7%増加している。このことから、送信コストの増加はスループットの向上による影響が大きく、通信距離の増加による影響は小さいといえる。一方、受信コストはほぼ変化していない。平均ホップ数が減少していることから、収集ネットワーク形成時のノード1台あたりのデータ受信量が減少することが原因と考えられる。静的距離優先方式では、SR-N方式よりも、送信コストおよび受信コストは増加し、スループットは減少している。コストが増加する原因は、平均通信距離の増加と平均ホップ数の増加により、収集ネットワーク形成時のノード1台あたりのデータ転送量が増加するためと考えられる。その結果、コストが増加するにも関わらず、スループットは向上しない結果となった。

最後に、所要時間について考察する。SR-N方式では、SR

表2 平均コスト

Table 2 Average cost.

	SR	SR-N	静的
移動コスト[J]	9,598	8,575	2,134
送信コスト[J]	656	699	857
受信コスト[J]	134	132	143
総コスト[J]	10,388	9,406	3,134

表3 平均所要時間

Table 3 Average time.

	SR	SR-N	静的
センシング時間[秒]	13,748	14,363	14,196
移動時間[秒]	9,598	8,575	2,134
通信時間[秒]	3,581	4,153	6,603
待機時間[秒]	3,073	2,909	7,067
非接続待機時間[秒]	0	244	7,019
合計所要時間[秒]	30,000	30,000	30,000

表4 その他の評価結果

Table 4 Other results.

	SR	SR-N	静的
スループット[kbps]	880.3	931.4	899.1
平均通信距離[m]	40.5	44.2	48.9
平均ホップ数	41.7	38.8	43.5

方式と比較して移動時間が減少し、センシング時間が増加することでスループットが向上している。移動時間の減少は、先に述べた移動コストの減少と同様の理由である。一方、静的距離優先方式では、他の2つの手法と比較して待機時間、非接続待機時間が大きく増加している。これは、あるノードが停止位置に到着しても、そのノードと基地局の間で収集ネットワークに参加する予定のノードの到着を待たなければデータを送信できないため、基地局との通信を開始するまでに多くの時間が必要になるからである。また、SR-N方式よりもスループットが低いにも関わらず通信時間が長いのは、静的距離優先方式では、同時に多くのノードが通信を行い、通信速度が低下しているからであると考えられる。待機時間や通信時間が長くなると、センシングに向かう頻度が減少しセンシング時間が減少するため、スループットが低下している。

4.3.2 SR-N方式のノード群に関する考察

SR-N方式において、ノード群形成率、ノード群通信距離、ノード群初対面時通信距離、ノード群センシング直後参加率、ノード群通信距離内訳、急停止率を収集ネットワークに接続したときのノード群の大きさ別に調査した。それぞれ図5, 6, 7, 8に示す。

図5より、ノード群の大きさが1、つまりノード群を形成せずに単独で収集ネットワークに接続したノードの割合が約3割となっている。したがって、残りの約7割のノードが移動中にノード群を形成していたこととなる。このことから、ノードは移動中に他のノードと通信可能になる場合が多いことがわかる。しかし、大きなノード群が形成される割合は低い。

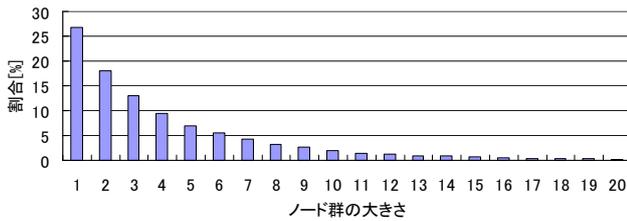


図5 ノード群サイズ

Fig.5 Histogram of node group sizes.

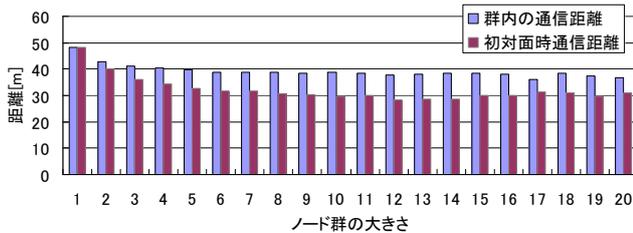


図6 ノード群通信距離

Fig.6 Communication distance in node groups.

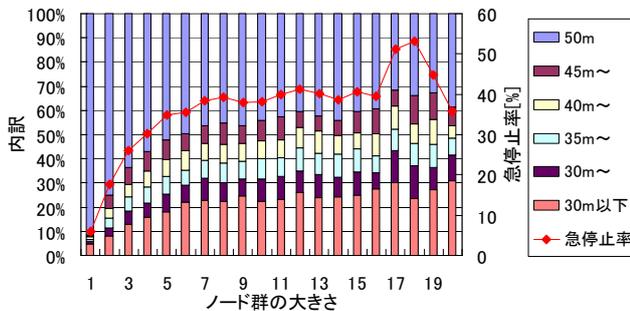


図7 ノード群通信距離の詳細

Fig.7 Detail of communication distance in node groups.

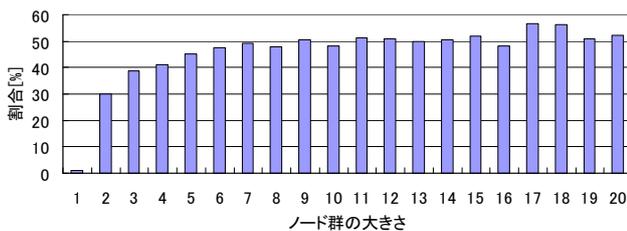


図8 ノード群センシング直後参加率

Fig.8 Rate of participation to a node group just after sensing.

図6より、収集ネットワークに接続したときの通信距離が初対面時通信距離より長くなっている。したがって、他のノードと連携して収集ネットワークに接続することで、ノード間距離を長く保っていることがわかる。ノード群が小さいほど、初対面時通信距離と通信距離の差は小さく、ノード群が大きくなるにつれて、初対面時通信距離が短くなっている。

図8より、ノード群が大きくなるにつれて、センシング終了直後にノード群に参加するノードの割合が高いことから、ノード群が大きいほど、他のノードと初めて通信可能になった時点ですでにノード間距離が短い場合が多いと考えられる。

る。

シミュレーション実験では、それぞれのノードは等しい速度で移動しているため、ノード群を形成しても、それぞれの目的地に到着するまでは、ノード間の距離はほとんど変化せず、ノード群の後方のノードから順に目的地に到着し、その後、ノード群の後方から順にノード間距離が延びると考えられる。しかし、図6から、ノード群の大きさが3以上の場合、通信距離が約40mしかなく、最大通信距離の50mよりも短い。さらに、図7から、ノード群が大きくなると通信距離が50mでないノードの割合が高く、ノード群が大きくなると急停止率が高いということがわかる。つまり、親ノードが目的地を変更することで残りの移動距離が急激に減少し、子ノードは移動する必要がなくなるといった状況が発生するため、ノード間距離が延びないまま収集ネットワークに参加していると考えられる。したがって、ノード群のノード間距離を十分に離すためには、ノード群を形成してからすぐにノード間の距離が離れるように動作させる必要がある。

#### 4.4 ノードの障害について

本論文では、ノード障害が発生しない理想的な環境を想定しているが、実環境ではノード障害がある程度の頻度で発生するものと考えられる。そこで本節では、ノードの障害が発生する場合の各手法の性能について議論する。

4.1節で述べたように、静的距離優先方式はノードの障害が発生する環境には適さない。例えば、移動中やセンシング中にノードの故障が起きた場合、予め決定した停止位置にノードが到着しないことが考えられる。このとき、収集ネットワークにおいて、故障したノードに対してセンシングデータを送信する予定であったノードは、基地局にデータを送信できなくなる。ノードが再びセンシング地点に戻るには、すべてのノードが収集ネットワークに接続する必要があるため、ノード故障が発生するとセンシングの再開が困難となる。

ただし、基地局は各ノードのセンシング地点やセンシング時間を把握できるため、各ノードが停止位置に到着する時間を予測できる。予測した到着時刻を過ぎても収集ネットワークに接続しないノードがある場合、サーバはそのノードが故障したと判断できる。このとき、故障したノードにデータ送信をする予定だったノードは、再度移動し、収集ネットワークを再形成する必要がある。収集ネットワーク形成中に複数台のノードが故障した場合は、何度も収集ネットワークの再形成を行うこととなる。

以上の方法で故障への対応は可能であるが、収集ネットワークを部分的に再形成した場合、最適なトポロジになるとは限らないことや収集ネットワーク再形成に非常に長い時間を要することが考えられる。また、故障を考慮すると予め最適なトポロジを決定できないという問題がある。さらに、地理・気象などの影響を考慮した場合、ノードの通信可能距離が場所ごとに不規則に変化するため、予めノードの停止位置を決定することが困難な場合が多い。

一方、SR-N方式においても上記と同様の方法でノードの故障を予測できる。また、ノード群を形成している場合はhelloメッセージに対する応答の有無で、簡単にノードの故障を知ることができる。ノードの到着予測時刻を基に収集ネットワークのタイムアウト時間を決めておけば、ノードが故障した場合も、故障ノード以外は収集ネットワークに接続済みなので、他のノードは特別な動作をする必要がなく、すばやくセンシングに戻ることができる。なおかつ、地理・気象などにより通信可能距離が変化しても、収集ネットワークに接続し

ているノードの位置は放送により知ることができるため、通信可能な位置まで移動することで柔軟に対応できる。

このように、静的距離優先方式は理想的な環境でしか動作しないため、実環境では様々な状況に柔軟に適応しうる SR-N 方式の方がより効果的であるといえる。

## 5. おわりに

本論文では、移動型センサノードによって構成される疎なセンサネットワークにおいて、互いの目的地情報を交換することで、ネットワーク形成時の移動コストを低減するノードの移動制御手法について、詳細な評価実験の結果を紹介した。シミュレーション評価により、SR-N 方式を用いることで、SR 方式と比べ、ノードの移動コストが減少し、スループットが向上することを確認した。さらに、SR-N 方式と静的距離優先方式とを比較した場合、ノードの移動コストが非常に大きいという問題があることがわかった。しかし、静的距離優先方式のような移動コストのみを考慮した方式では、移動コストは小さくなるものの、スループットが低下する。また、SR-N 方式において、ノード群内の通信距離が十分長くはならないということもわかった。

今後は SR-N 方式におけるノードの移動コストを更に削減しつつ、ノード群を形成した場合にノード間距離が十分離れる手法を検討していく必要がある。また、ノードの故障が発生する環境における具体的な対処法の検討と評価を行う必要がある。

## [謝辞]

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A) (17200006)、特定領域研究(18049050)および若手研究(B) (19700092)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## [文献]

- [1] Dahlberg, T. A., Nasipuri, A. and Taylor, C.: "Explorebots: A mobile network experimentation testbed", Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Experimental Approaches to Wireless Network Design and Analysis (E-WIND 2005), pp.76-81 (2005).
- [2] Sibley, G. T., Rahimi, M. H. and Sukhatme, G. S.: "Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002), pp.1143-1148 (2002).
- [3] Wang, G., Cao, G. and Porta, T. L.: "Movement-assisted sensor deployment", Proceedings of the Conference on Computer Communications, Vol.23, No.1, pp.2469-2479 (2004).
- [4] 新城達也, 永石博憲, 小川剛史, 原 隆浩, 西尾章治郎: "移動型センサネットワークにおけるプッシュ型放送を用いたノードの移動制御手法", 情報処理学会研究報告, Vol.2007, No.16, pp.159-164 (2007).
- [5] 新城達也, 北島信哉, 小川剛史, 原 隆浩, 西尾章治郎: "移動型センサネットワークにおけるプッシュ型放送とノード間通信を用いたノードの移動制御手法", 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, Vol.2007, No.9, pp.111-116 (2007).
- [6] Goldenberg, D. K., Lin, J., Morse, A. S., Rosen, B. E. and Yang, Y. R.: "Towards mobility as a network control primitive", Proceedings of ACM International

Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2004), pp.163-174 (2004).

- [7] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", Proceedings of Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2000), pp.1-10 (2000).

## 新城 達也 Tatsuya SHINJO

2007 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。同年、同大学大学院情報科学研究科博士前期課程に入学し、現在に至る。データベース、マルチメディアシステムなどの研究に従事。日本データベース学会学生会員。

## 北島 信哉 Shinya KITAJIMA

2005 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2006 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年、同大学大学院情報科学研究科後期課程に入学し、現在に至る。放送型データベースシステムの研究に興味をもつ。情報処理学会、日本データベース学会の各学生会員。

## 小川 剛史 Takefumi OGAWA

1997 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。2000 年同研究科博士後期課程中退後、大阪大学サイバーメディアセンター情報メディア教育研究部門助手、2007 年東京大学情報基盤センターキャンパスネットワークング研究部門講師、現在に至る。博士(情報科学)。グループウェア、ヒューマンインタフェース、仮想現実感、拡張現実感に興味をもつ。ACM、電子情報通信学会、日本バーチャルリアリティ学会の各会員。

## 原 隆浩 Takahiro HARA

1995 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院工学研究科博士後期課程中退後、同大学院工学研究科情報システム工学専攻助手、2002 年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手、2004 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻准教授となり、現在に至る。工学博士。1996 年本学会山下記念研究賞受賞。2000 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2003 年本学会研究開発奨励賞受賞。データベースシステム、分散処理に興味を持つ。IEEE、ACM、電子情報通信学会、日本データベース学会の各会員。

## 西尾 章治郎 Shojiro NISHIO

1975 年京都大学工学部数理工学科卒業。1980 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手、大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授、大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て、2002 年より大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり、現在に至る。2000 年より大阪大学サイバーメディアセンター長、2003 年より大阪大学大学院情報科学研究科長、その後 2007 年より大阪大学理事・副学長に就任。この間、カナダ・ウォータールー大学、ビクトリア大学客員。データベース、マルチメディアシステムの研究に従事。現在、Data & Knowledge Engineering 等の論文誌編集委員。本会理事を歴任。電子情報通信学会フェローを含め、ACM、IEEE 等 8 学会の各会員。