

移動型センサネットワークにおける ノードの故障を考慮したノードの移動制御手法

新城 達也[†] 北島 信哉[†] 小川 剛史[‡] 原 隆浩[†] 西尾 章治郎[†]

[†]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
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: {shinjo.tatsuya, kitajima.shinya, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡]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

〒113-8658 東京都文京区弥生 2-11-16

E-mail: ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

近年の無線通信技術及びロボティクス技術の発展に伴い、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、センシングデータを収集する際のノードの移動コストの低減を目的として、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きた。本稿では、ノードの移動コストをさらに削減し、また、ノード故障が発生する環境においてもセンシングデータを正常に収集できるように、これまでの手法を拡張した。さらに、シミュレーション実験によって本手法の有効性について検証した。

A Node Movement Control Method Considering Node Failure in Mobile Sensor Networks

Tatsuya SHINJO[†] Shinya KITAJIMA[†] Takefumi OGAWA[†]
Takahiro HARA[†] Shojiro NISHIO[†]

[†]Dept. of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: {shinjo.tatsuya, kitajima.shinya, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡]Campus Networking Division, Information Technology Center, The University of Tokyo
2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8658 Japan

E-mail: ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

Recent advance in wireless communication and robotics technologies has led to an increasing interest in mobile sensor networks. In our previous work, we proposed a method that controls movement of sensor nodes by using push-based broadcast and communication among nodes in order to reduce moving cost of nodes when nodes deliver sensed data to a sink node. In this paper, we propose the methods which reduce more moving cost of the nodes than our previous methods, and support for node failure. Moreover, we also show the simulation results to evaluate our 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 [2, 5].

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、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、広大な領域を限られた数のノードでセンシングする場合、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しなければならず、

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 方式と、その拡張方式である SR-N 方式を提案した [3, 4]. SR-N 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、各ノードの移動距離を減少し、移動に要する電力を低減できる。また、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、移動距離をさらに削減している。

しかし、この手法では、収集ネットワーク形成時のノード間距離が十分に広がらず、無駄な移動が生じていることが分かった。そこで本稿では、SR-N 方式を拡張し、ネットワーク形成時のノード間距離

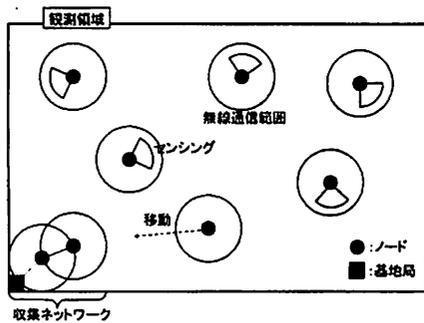


図 1: 想定環境

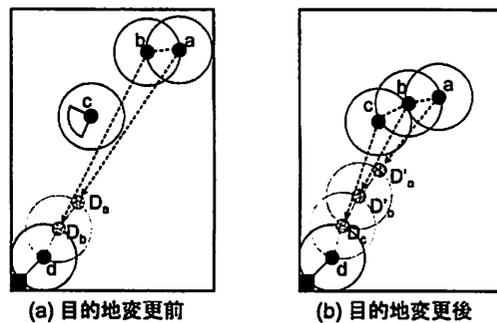


図 2: SR 方式

を十分に広げ、移動コストをさらに低減するノード移動制御手法を提案する。提案手法では、協調的に移動するノード同士がノード間の距離を把握し、ノード間の距離を十分に保ったまま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る。

また、これまでは、ノードが故障しない理想的な環境を想定しており、観測領域内のすべてのノードがネットワークに参加しないと再びセンシングに向かうことができない。本稿では、実環境への適用を考慮して、ノードの故障が発生する環境への対処法を提案する。具体的には、ノードがネットワークに参加する時刻を基地局が予測し、予測した時刻を過ぎてもネットワークに参加していないノードを故障とみなすことで、他のノードがデータ転送後に再びセンシングに向かえるようにする。

以降、2章で想定環境について説明し、3章において提案手法の詳細を述べる。4章でシミュレーションによる提案手法の評価結果を示す。最後に5章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 想定環境

本研究では、図1に示すように、観測領域に1つの基地局と複数のセンサノードが存在する環境を想定する。領域中のセンサ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。また、基地局は各ノードのセンシング地点を事前に把握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、基地局の位置と担当するセンシング位置、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。センシングを終えたノードは、基地局と通信可能となる位置まで観測領域内を移動し、基地局までデータを転送する。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

が可能となる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、センシング地点へと戻り、センシングを継続する。

3 提案手法

本章では、SR[3] および SR-N 方式 [4] の概要について述べたのち、SR-N 方式の拡張手法である SR-N2 方式、および、ノードの故障への対処法について述べる。

3.1 SR(Shortest Route) 方式

SR 方式では、収集ネットワークを効率よく形成するために、基地局が収集ネットワークに参加しているノードの位置情報が放送し、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、放送される情報に基づいて、収集ネットワークに参加しているノードのうち、自身から最も近いノード c と通信可能な位置 D_a, D_b を目的地として移動する。図中では、点線矢印は移動経路を表している。また、 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

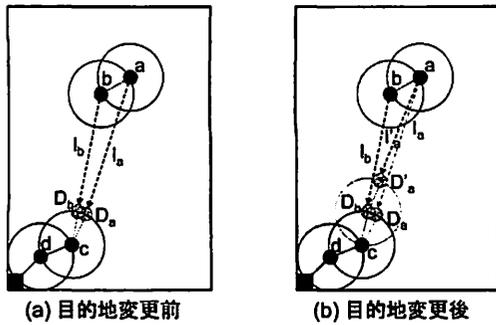


図 3: 単独ノード同士が出会った例

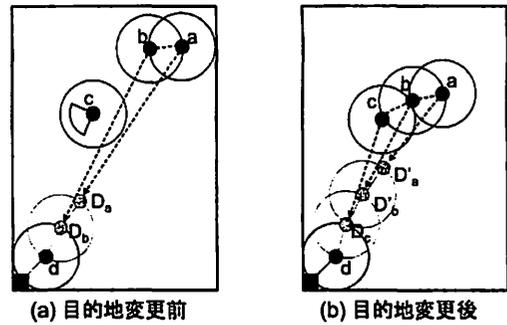


図 4: ノード群と単独ノードが出会った例

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。

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。

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や、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。

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は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。

3.3 拡張方式：SR-N2方式

SR-N方式では、ノード群のノード間距離が十分広がらずに不要な移動があるという問題があった[4]。この問題を解決するためにSR-N方式を拡張

し、SR-N2方式を提案する。SR-N2方式では、移動中にノード群を形成したノードが、ノード間の距離を通信により把握し、十分に距離を保ったまま移動することでネットワーク形成時のノード間距離を十分に広げる。以下に、子ノードの動作について述べる。

1. 子ノードとしてノード群に参加する際、親ノードが停止状態、もしくは、親ノードとの距離が最大通信距離の $X\%$ より短い場合は、その場に停止する。
2. 親ノードとの距離が最大通信距離となったら移動を再開し、親ノードとの距離が最大通信距離の $X\%$ より短くなった場合、その場に停止する。
3. 停止状態から移動を再開する時に、その旨を自身の子ノードへ通知する。
4. 停止状態の親ノードから移動の通知を受けた時、親ノードとの距離が最大通信距離の場合は移動を再開する。

3.4 ノード故障への対応

上述の3方式では、すべてのノードが収集ネットワークに参加した後、データの転送および中継を終えたノードは収集ネットワークに接続している必要が無い場合、センシング地点への移動を開始するものとしている。しかし、ノード故障が発生した場合、収集ネットワークにすべてのノードが参加できなくなるため、ノードは収集ネットワークを離れることができない。そこで、基地局が各ノードの収集ネットワークへの参加時刻を予想し、予想時刻を経過しても参加しないノードは故障したものと判断して、他ノードの収集ネットワークからの離脱を許可する。

具体的には、ノード n が k 回目に収集ネットワークへ参加した時刻および収集ネットワークから離脱した時刻をそれぞれ $T_{pn,k}$ 、 $T_{ln,k}$ とし、式(1)を用いて $k+1$ 回目の参加時刻 $T'_{pn,k+1}$ を予想する。

$$T'_{pn,k+1} = T_{ln,k} + \max_{i=2}^k (T_{pn,i} - T_{ln,i-1}) \quad (1)$$

式(1)では、過去の所要時間(収集ネットワークから離脱してから、再びデータ転送のために収集ネットワークに接続するまでの時間)の最大値を用いて、次回の到着時刻を予想しており、できる限り、故障していないノードを故障ノードと誤判定しないようにしている。

なお、ノードがセンシングを開始してから、1回目と2回目の収集ネットワークへの参加時刻は、所要時間に関する過去の情報が利用できない。そのため、1回目は、センシング時間とセンシング地点から基地局と通信可能な地点までの移動時間の合計、2回目は、離脱地点からセンシング地点までの移動

表 1: パラメータ

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	200,000[秒]

時間、センシング時間、センシング地点から基地局と通信可能な地点までの移動時間の合計を用いることとする。

また、基地局が収集ネットワークに接続しているノードに離脱を許可する際、2回続けて収集ネットワークに参加していないノードは故障したものと判断し、そのノードがセンシングしていた地点に新しいノードを追加して、観測を継続する。追加したノードがセンシングを開始する時刻は放送によって知らせるものとし、その時刻は追加したノードのセンシング地点に最も近いノードのセンシング開始時刻と同じとする。なお、シミュレーション実験では、故障していないノードを故障と誤判断してノードを追加する状況は発生しなかった。

4 性能評価

シミュレーション実験により、提案手法の性能評価を行った。

4.1 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、ノー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(2)および式(3)によりモデル化した。

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

$$k \cdot 50 \text{ [nJ]} \quad (3)$$

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[1]、送信コストおよび受信コストは文献[6]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。

まず、次の3つの評価項目を用いて、SR-N方式とSR-N2方式の性能を比較した。ここで、SR-N2方式においては、 X は80, 90, 99と変化させた。

- ・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。

- ・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。

さらにSR-N2方式におけるノード故障に対する性能を、次の4つの評価項目を用いて評価した。予想参加時刻 $T'_{pn,k+1}$ を式(4)で算出することとし、係数 a の値を0.7から1.3まで変化させた。 $(a=1.0$ のとき式(1)と等しくなる)。

$$T'_{pn,k+1} = T_{ln,k} + a \cdot \max_{i=2}^k (T_{pn,i} - T_{ln,i-1}) \quad (4)$$

- ・移動距離：全ノードの移動距離の合計。

- ・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。

- ・故障誤判定数：基地局が収集ネットワークからノードの離脱を許可した時に、故障していないノードを誤って故障と判定した数。

- ・無駄な待機時間：故障していない全ノードが収集ネットワークに参加しており、収集ネットワークから離脱可能な状態のノードが、基地局から離脱を許可されるまで、通信もせずに待機する時間の合計。

なお、簡単のため、センシング中のノードのみ故障するものとした。また、故障するノードを1回のセンシング当たり1, 5, 10台の割合で変化させて、それぞれシミュレーションを10回行った。

4.2 評価結果

4.2.1 SR-N方式とSR-N2方式の比較

平均コスト、スループット、および、平均通信距離を表2に示す。表から、SR-N2方式ではSR-N方式と比較して、移動コストが減少し、スループット、平均通信距離が増加していることがわかる。この結果から、SR-N2方式では、移動中にノード群を形成したノード同士のノード間距離が十分保たれ、移動距離が減少したといえる。また、 X が100に近いほど移動コストが減少し、平均通信距離が増加し

表 2: SR-N方式とSR-N2方式の比較

X	SR-N	SR-N2		
	-	80	90	99
移動コスト [J]	58,909	53,791	53,449	52,936
送信コスト [J]	4,803	5,168	5,125	5,175
受信コスト [J]	893	865	849	850
総コスト [J]	64,606	59,824	59,423	58,961
スループット [kbps]	931	970	970	976
通信距離 [m]	44.4	48.0	48.2	48.3

ていることがわかる。これは、 X が100に近いほどノード間距離が長く保たれ、不必要に移動しないためである。

4.2.2 ノード故障への対処法

故障誤判定数、無駄な待機時間、スループット、移動距離を図5から図8に示す。SR-N2方式における X は4.2.1節の結果から移動コストが最も小さかった99を用いた。

図5から $a=0.7, 0.8, 0.9$ の場合は故障誤判定数が多い。予想所要時間が過去の最大所要時間より短いため、ノードが収集ネットワークに参加する前にそのノードが故障していると基地局が誤判定する確率が高くなるからである。また、故障誤判定数が多く、スループットも低いことから、所要予想時間の決め方としては不適切であるといえる。一方、 a が1.1以上の場合、故障誤判定数はほぼ0である。このことから予想所要時間を過去の最大所要時間より長く設定することで、故障誤判定を減らせることがわかる。

図6から、故障ノード数が増えると無駄な待機時間も増加することがわかる。また、 a の値が1より大きくなるほど無駄な待機時間が増加しているが、これは a の値が大きいと予想所要時間が長くなるためである。一方、 a の値が1未満でもノードの故障数が多いと無駄な待機時間が長い。これは故障と誤判定されたノードが基地局付近に到達する際にはすでに収集ネットワークが解散しているため、短い移動距離で収集ネットワークに接続できず、所要時間が大幅に増加するとともに予想所要時間も長くなり、無駄な待機時間が発生するためである。

図7から、 $a=1.1$ のスループットが最も高いことがわかる。つまり、予想所要時間を過去の最大所要時間より少し長くすることでノードの故障誤判定もほぼ0となり、無駄な待機時間も少なくできる。その結果、ノードがセンシングに向かう頻度が多くなり、スループットが向上し、移動距離が増加する。また、図8から、故障ノード数が増えると移動距離は短くなることが分かる。さらに、 a が1未満の場合と1以上の場合では、1未満の場合の故障ノードの増加数に対する移動距離の減少率が大きい。これは、 a が1未満の場合、図6の無駄な待機時間の増

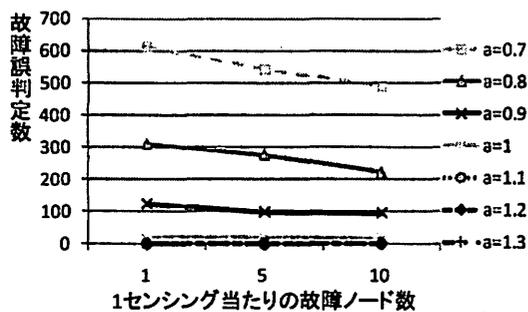


図 5: 故障誤判定数

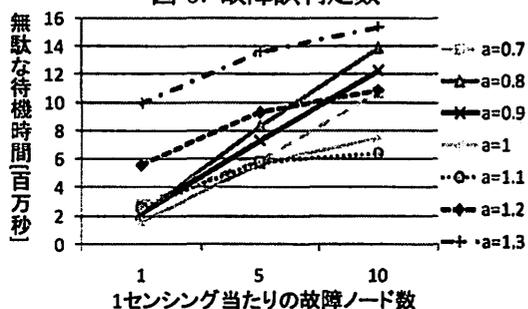


図 6: 無駄な待機時間

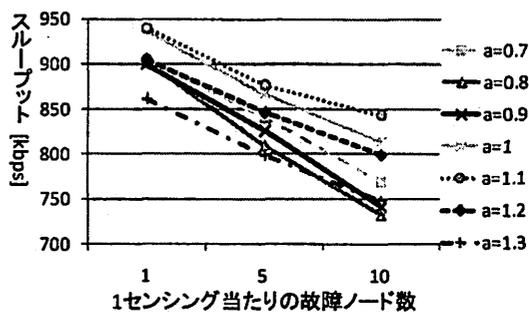


図 7: スループット

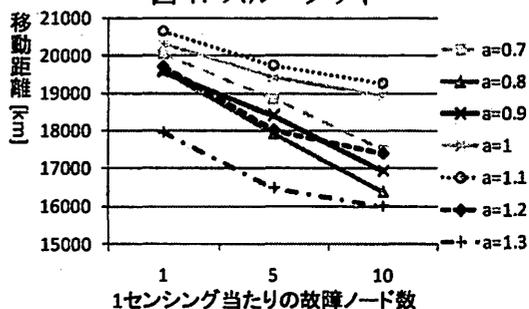


図 8: 移動距離

加率が高いことから、センシングに向かう頻度の減少率が高くなり、その結果スループットおよび移動距離の減少率が高くなるからである。また、スループットは $a=0.7$ の方が $a=1.2$ より低い、移動距離は $a=0.7$ の方が長い。これは前述のように、 a が 1 未満の場合、故障誤判定により移動距離が長くなるためであり、故障誤判定が移動距離の増加に大きく影響を与えていることがわかる。

以上から、故障誤判定が少なく、無駄な待機時間も少なく、かつスループットも高い $a=1.1$ の場合がノード故障への対処法として、最も適していると言える。

5 まとめ

本稿では、移動型センサネットワークノードによって構成されるセンサネットワークにおいて、協調的に移動するノード同士がノード間の距離を十分に保ったまま移動することで、移動コストを減らす手法、および、ノード故障が発生する場合の対処法を提案した。シミュレーション評価により、SR-N 方式を拡張した SR-N2 方式において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。また、過去のセンシングおよび移動の所要時間を用いてノードの到着予想時刻を予測することで、ノードの故障に対応でき、予想所要時間を過去の最大所要時間より少し長くした場合にスループットが最も高いことを確認した。

今後は、提案手法をさらに改良し、ノードの故障が発生する場合に、より適切に収集ネットワークからノードの離脱を許可し、無駄な待機時間を減らす方法を検討する予定である。

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)、平成 20 年度総務省委託研究「ユビキタスサービスプラットフォーム技術の研究開発」の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] D. K. Goldenberg, J. Lin, A. S. Morse, B. E. Rosen, and Y. R. Yang, "Towards mobility as a network control primitive," in *Proc. Mobihoc 2004*, pp. 163–174 (2004).
- [2] G. T. Sibley, M. H. Rahimi, and G. S. Sukhatme, "Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks," in *Proc. ICRA 2002*, pp. 1143–1148 (2002).
- [3] 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).
- [4] 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に関する一考察," 電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS 2008) 論文集 (2008).
- [5] T. A. Dahlberg, A. Nasipuri, and C. Taylor, "Explorebots: A mobile network experimentation testbed," in *Proc. E-WIND 2005*, pp. 76–81 (2005).
- [6] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. HICSS 2000*, pp. 1–10 (2000).