

プッシュ型放送を用いたセンサノードの移動制御のための 故障対応手法について

新城 達也[†] 北島 信哉[†] 小川 剛史[‡] 原 隆浩[†] 義久 智樹[†] 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

E-mail: {shinjo.tatsuya, kitajima.shinya, hara, yoshihisa, 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

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

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、プッシュ型放送を用いてセンシングデータを収集する際の移動コストを低減するノードの移動制御手法を提案してきた。この手法では、センシング中のノードが故障しても正常にデータ収集が行えるが、基地局が取得するデータ量が減少する。本稿では、これまでの提案手法を拡張して、移動中のノード故障にも対処でき、基地局の取得データ量を向上させる手法を提案する。

Movement Control of Sensor Nodes Considering Node Failure Using Push-based Broadcast

Tatsuya SHINJO[†]

Shinya KITAJIMA[†]

Takefumi OGAWA[‡]

Takahiro HARA[†]

Tomoki YOSHIHISA[†]

Shojiro NISHIO[†]

[†]Dept. of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

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

[‡]Campus Networking Division, Information Technology Center, The University of Tokyo

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

Recent advance in wireless communication technology has led to an increasing interest in mobile sensor networks. In our previous work, we proposed a method which controls movement of sensor nodes by using push-based broadcast to reduce the moving cost when nodes deliver sensed data to a sink node. In this method, a sink node can gather sensed data in case that node failures occur while the nodes perform a sensing operation, but the amount of sensed data that the sink node can receive decreases. In this paper, we extend our previous method in order to deal with situations where node failures occur while nodes migrate to the sink node. This extended method also enables the sink node to gather more sensed data than our previous method.

1 はじめに

近年、無線通信技術および半導体技術の進歩に伴い、無線通信デバイスの小型化、軽量化、高性能化が進んでいる。これにより、無線通信機能を備えた小型のセンサノード（以下、ノードと呼ぶ）で形成される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, 3]。さらに、近年のロボティクス技術の発展により、ノード自身が移動して、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も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を少数で行うことが可能となるため、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で移動しなければならない、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、プッシュ型放送を用いたノードの移動制御手法として SR-N2 方式を提案した [4]。SR-N2 方式では、プッシュ型放送を用いて、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配信し、各ノードはその情報をもとに、一時的なネットワークを形成して基地局にデータを転送する。ノードの故障が発生する環境を考慮しており、基地局が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は故障したとみなすことで、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した。しかし、ノードがセンシング中の故障にのみ対応しており、ノード

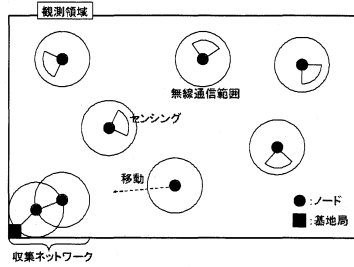


図 1: 想定環境

ドがセンシング中以外に故障した場合には問題が生じる。また、ノードが再びセンシングに向かうまでに多くの時間がかかり、基地局が取得するデータ量が低下するという問題も発生していた。

そこで本稿では、移動中のノードが故障した場合に対応するための手法を提案する。単独のノードが移動中に故障した場合は、これまでの手法で対応可能なため、ノード間で協調して移動しているノードが故障した場合への対応について述べる。また、基地局が取得するデータ量の向上を目的として、ノードがネットワークに参加する時刻の予想手法の改善案を提案する。

以降、2章で想定環境について説明し、3章で従来方式について説明する。4章で提案する故障対応の手法について述べ、5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6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

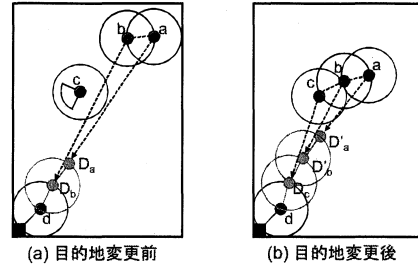


図 2: ノードの基本動作

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 従来方式

本章では、筆者らが提案したSR-N2方式[4]の概要について述べる。

3.1 SR-N2(Shortest Route with Negotiation 2)方式

3.1.1 ノードの基本動作

SR-N2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。

3.1.2 移動中にノード同士が出会う場合

3.1.1節で述べた基本動作に加え、SR-N2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になった際に、目的地情報を交換

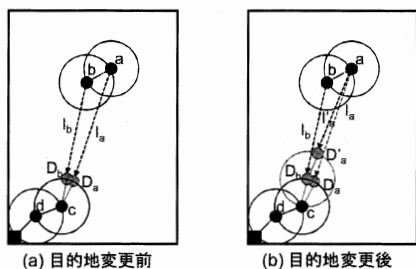


図 3: 単独ノード同士が出会った例

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、移動中にノード同士が出会う場合のノードの動作を、単独ノード同士が出会った場合について説明する。

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。

すで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。

SR-N2 方式では、ノードの移動距離を削減するために、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 99 % 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 99 % 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。

3.2 従来の故障対応手法

SR-N2 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ため、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。文献 [4] では、参加時刻の予想方法として次に述べる方法を提案した。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 $T_{pn,k}, T_{ln,k}$ として、式 (1) を用いて $k+1$ 回目の参加時刻 $T'_{pn,k+1}$ を予想する。

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

なお、変数 x は定数とする。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。

4 提案する故障対応手法

従来の故障対応手法では、センシング中のノード故障にのみ対応しており、ノード群を形成しているノードが故障するとノード群が分断され、収集ネットワークを正常に構築できなかった。本章では、移動中のノードが故障した場合の制御手法を提案する。また、従来の故障対策では、ノードが収集ネットワークから離脱するまでに多くの時間を要し、センシングの頻度が減少するため、スループットが低下する問題があった。そこで、より早くノードが収集ネットワークから離脱できる方法についても提案する。

4.1 ノード群を形成するノードの故障への対応

収集ネットワークに接続するために移動しているノード群内のノードが故障した場合、故障したノードの親ノードおよび子ノードは、故障ノードと通信できなくなり、故障ノードの後方および前方のノードと目的地情報をやりとりできなくなる。このとき、目的地情報の修正および目的地の変更を以下の動作にしたがって起こそう。

自身の親ノードが故障した場合

親ノードおよびその前方のノード群の目的地情報を削除し、放送により目的地を再決定する。また、子ノード(およびその後方のノード群)にノードが故障したことおよび目的地を変更したことを知らせる。

自身の子ノードが故障した場合

子ノードおよびその後方のノード群の目的地情報を削除する。また、親ノード(およびその前方のノード群)に子ノードが故障したことを知らせる。

また、故障したノードのIDを保持しておき、収集ネットワーク接続時に故障ノードのIDも送信することで、基地局は故障したノードの情報を得ることができ、ノードの予想到着時刻を経過する前に対処が可能となる。

4.2 収集ネットワークへの参加時刻の予想

SR-N2方式では、ノードは放送をもとに目的地を適宜変更しながら移動する。そのため、最終的に収集ネットワークに接続した位置は、センシングを終え移動を開始したときの目的地より移動距離が短い位置になっていると考えられる。収集ネットワークへの参加時刻をより正確に算出するためには、ノードの目的地の変更を考慮する必要がある。

ここで基地局は、収集ネットワークを通じて各ノードの収集ネットワークへの参加位置および各ノードが収集ネットワークを離脱する時刻を知ることができる。また、ノードのセンシング位置は基地局があらかじめ把握している。本研究では、ノードの移動速度、およびセンシングの時間は一定と想定しているため、ノードがセンシングを終えて移動を開始する時刻を算出できる。また、移動開始時の収集ネットワークを参照することで、ノードの移動開始時の目的地および目的地までの移動時間も算出可能である。

そこで、ノード n が k 回目に収集ネットワークへ向けて移動開始する時刻およびその時点の目的地までの予想移動時間をそれぞれ $T_{sn,k}$ 、 $T_{dn,k}$ とし、以下の式をもとに k 回目の参加時刻 $T'_{pn,k}$ を予想する。

$$T'_{pn,k} = T_{sn,k} + y \cdot T_{dn,k} \quad (2)$$

なお、本稿では定数 y を変化させて性能を調べる。

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。

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]
シミュレーション時間	200,000[秒]

5 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。実験では、文献 [4] におけるノード故障対応手法（以下、従来方式とよぶ）と本稿で提案する対応手法の性能を比較した。また、ノードの故障を完全に把握することのできる理想的な環境との比較も行った。

5.1 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。

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。また、従来方式で用いる x は、予備実験の結果から $x=1.1$ とした。

5.2 評価項目

次の 4 つの評価項目を用いて、提案手法の性能を評価した。

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。

無駄な待機時間の割合：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が全所要時間の合計に占める割合。

また、ノードはセンシング中および移動中に故障するものとし、故障するノードを収集ネットワークの 1 度の形成当たり 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。

5.2.1 評価結果

故障誤判定数、無駄な待機時間の割合、スループット、移動距離を図 4 から図 7 に示す。

図 4 から、 $y \leq 0.3$ の場合、故障誤判定数がほぼ 0 であることがわかる。また、 $y = 0.2$ のとき、故障誤判定数が大量に増加していることもわかる。つまり、 $y \leq 0.3$ の場合は、ほぼすべてのノードが収集ネットワークに参加した後にノードの離脱が許可されるが、 y が 0.3 より小さい場合、ノードの参加時刻をきちんと予想できず、多くのノードの収集ネットワークへの参加を待たずして、ノードの離脱が許可されてしまっているということである。

図 5 から、 y が大きくなるほど無駄な待機時間の割合が増加していることがわかる。これは、 y が小さいほどノードは早く収集ネットワークから離脱できるためである。 $y = 0.2$ の場合に無駄な待機時間の割合は最も小さくなっているが、故障誤判定数が非常に多いことから、ノードの参加時刻の予想方法としては適さない。また、 $y = 0.3$ と従来方式を比較すると、無駄な待機時間の割合が最大で 4 分の 1 程度まで小さくなり、故障の誤判定をほぼ 0 にしたまま、無駄な待機時間の割合を大幅に削減できている。

図 6 から、理想の環境を除くと、 $y = 0.3$ の場合のスループットが最も高いことがわかる。これは、故障の誤判定がほぼ 0 であり、無駄な待機時間の割合も小さいため、センシングに向かう頻度が多くなったからである。一方、 $y = 0.2$ の場合、スループットは最も低くなっている。 $y = 0.2$ の場合、無駄な待機時間の割合は小さいが、故障誤判定数が非常に多いことから、故障誤判定されたノードが収集ネットワークに参加する場合、収集ネットワークからノードの離脱が始まっているため、実際に収集ネットワークに接続するまでに長い距離を移動する必要があり、再びセンシングに向かうのに時間を要してしまう。よって、スループットが低下したと考えられる。また、 $y = 0.3$ のスループットを理想環境と比較すると、ノードの故障数が多くなるほど、

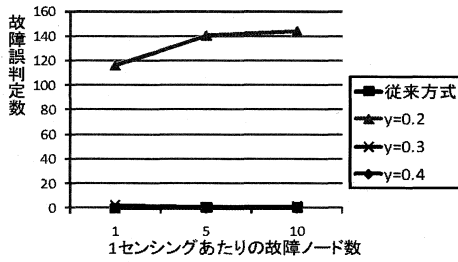


図 4: 故障誤判定数

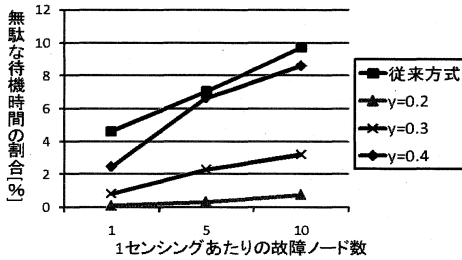


図 5: 無駄な待機時間の割合

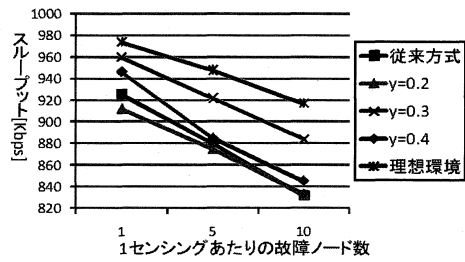


図 6: スループット

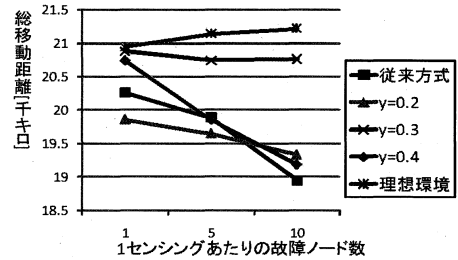


図 7: 移動距離

スループットが減少していることがわかる。ノードの故障数が少ない環境においては理想環境に近いスループットが出ているが、故障数が多いとスループットの差が大きくなっている。これは、故障数が多い場合、収集ネットワークに参加するまでの移動時間が長いノードの故障数も増えるためと考えられる。

図 7 から理想の環境を除くと、 $y = 0.3$ の場合の移動コストが最も大きい。これは、スループットが高いことから、センシングに向かう頻度が高く、移動距離が長くなるためである。また、理想環境では、ノードの故障数が多いほど移動コストが多い。これは、ノードの故障数が多いと、領域内のノードの密度が低くなることで、各ノードが収集ネットワークに接続するまでに必要な移動距離が長くなるためと考えられる。結果として、スループットが低いにも関わらず移動コストが増加したといえる。このことから、 $y = 0.3$ の場合にノード故障数が増えても移動コストがあまり変化していない要因も同様であると考えられる。

6 まとめ

本稿では、プッシュ型放送を移動型センサネットワークに適用したノード移動制御手法を拡張し、ノードが移動中に故障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手法および、スループットを向上する手法を提案した。シミュレーション結果により、提案した故障対応手法は従来の故障

対応手法と比較して、故障誤判定数はほぼ 0 のまま、無駄な待機時間の割合を大幅に削減し、スループットが向上することを確認した。

今後は、収集ネットワークを形成して通信中のノードが故障する場合に対応する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. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava, "Instrumenting the world with wireless sensor networks," in *Proc. ICASSP 2001*, pp. 2033–2036 (2001).
- [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] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks (Elsevier) Journal*, Vol. 38, No. 4, pp. 393–422 (2002).
- [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ノードの故障を考慮し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. 2008, No. 14, pp. 297–302(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).