

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

新城 達也[†] 永石 博憲[†] 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@ise.eng.osaka-u.ac.jp, {nagaishi.hironori, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡] 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

〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

E-mail: ogawa@ime.cmc.osaka-u.ac.jp

移動型センサノードを用いて構成されるセンサネットワークにおいてノードの密度が低い場合、各ノードの無線通信範囲に他のノードが存在しない可能性が高く、センシングデータを基地局に収集するためにすべてのノードが基地局の無線通信範囲内に移動する必要がある。そのため、ノードの移動に多くの電力を消費し、センシングデータを基地局に収集するために必要なコストが大きくなる。本稿では、センサノード群が基地局に接続するための一時的なネットワークを形成し、マルチホップ通信によって低コストにデータを転送することを目的として、プッシュ型放送配信を用いたセンサノード制御手法を提案する。また、シミュレーション実験により、提案手法を用いた場合にセンシングデータ収集時のノードの移動コストを削減できること確認した。

A Node Movement Control Method using Push-based Broadcast in Mobile Sensor Networks

Tatsuya SHINJO[†] Hironori NAGAISHI[†] 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@ise.eng.osaka-u.ac.jp, {nagaishi.hironori, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡]Infomedia Education Division, Cybermedia Center, Osaka University

1-32 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-0043, Japan

E-mail: ogawa@ime.cmc.osaka-u.ac.jp

In mobile sensor networks with a small number of nodes, since nodes' radio communication range doesn't cover the whole sensing area, every node has to move closer toward the sink for transmitting their sensed data. Thus, the power consumption to deliver the sensed data to the sink becomes large. In this paper, we assume that nodes construct a temporal network to deliver the sensed data with a low cost by using multihop communication, and proposed a method that controls nodes' movement, using the push-based broadcast. We also show the results of simulation experiments regarding the performance evaluation of our method. We confirmed that our proposed method reduce the power consumption for moving to the sink to deliver the sensed data.

1 はじめに

近年の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で形成されるセンサネットワークの研究が盛んに行われている [1, 4].

センサネットワークでは、センサノード (以下、

ノードと呼ぶ) が取得したセンシングデータを、マルチホップ通信により、基地局に転送し収集する。センサネットワークの応用としては、環境のモニタリング、動植物の生体調査、建物内のセキュリティ管理などが挙げられる。従来は、ノードの位置が固定された環境を想定したものが一般的であったが、近年のロボット技術の発展により、ノード自身が移

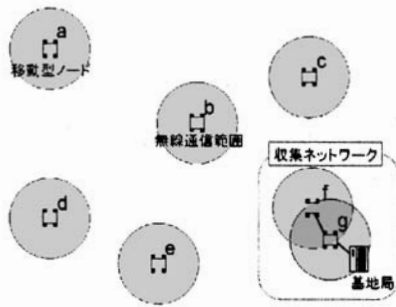


図 1: 想定環境

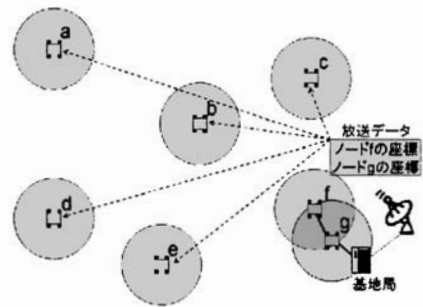


図 2: プッシュ型放送による
収集ネットワークのノード位置の提供

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が注目を集めている [3, 5].

ノードが固定されている場合、広範囲のセンシングには多数のノードが必要となるが、移動型ノードを用いることにより、少数のノードでセンシングが可能となる。一方、ノード数の少ない環境では、無線通信範囲に他のノードが存在しない可能性が高く、センシングデータを基地局に収集するために、すべてのノードが基地局の無線通信範囲内に移動する必要がある。そのため、ノードの移動に多くの電力を消費し、センシングデータを基地局に収集するために多大なコストが必要となる問題が生じる。

本稿では、ノード群が基地局に接続するための一時的なネットワークを形成し、マルチホップ通信によって低コストにデータ転送することを目的として、プッシュ型放送配信を用いたノード制御手法を提案する。提案手法では、移動型ノードが基地局のネットワークにマルチホップ接続可能な位置を放送により取得し、現在位置より近い接続地点へ移動する。その結果、センシングデータの収集時における移動距離が短縮され、移動に必要なコストを削減できる。

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

本研究の想定環境を図1に示す。観測領域に1つの基地局と複数 (m 個) のセンサノードが存在する。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こととする。図1に示すように各ノードの通信可能範囲よりもノード

間距離が大きく、ノードがセンシング位置に固定しては、基地局や他のノードと通信することができないため、ノードは通信可能となる位置まで観測領域内を移動して基地局へのデータの転送を行う。ノードはデータの転送の際、マルチホップ通信可能なネットワーク (以後、収集ネットワークと呼ぶ) を形成する。なお本稿では簡単化のため、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。

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。

3 提案手法

本章では、基地局にセンシングデータを収集する際に収集ネットワークを効率よく構築するために、既に基地局とマルチホップ通信が可能となっているノード群の座標を放送し、その情報に基づいてノードが移動するSR(Shortest Route)方式を提案する。図2では、基地局は既にマルチホップ通信が可能となっているノード f , g の位置を知ることができるため、それらの位置情報を、放送を使ってすべてのノードに提供している。このようにSR方式では、収集ネットワークに参加しているノードの座標が、プッシュ型放送によって観測領域内の全ノードに提供され、ノードは収集ネットワークに参加するために、自身の現在位置と最短距離に存在するノードと接続するために移動する。ノードの動作は、割り当てられた地点でセンシングする観測フェーズと、データを基地局に配送する収集フェーズに分類される。

図2の状況において、ノード b およびノード e がセンシングを終了した場合、それぞれ観測フェーズ

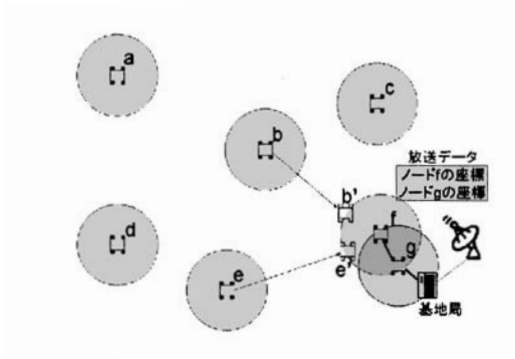


図 3: ノードの目的地決定

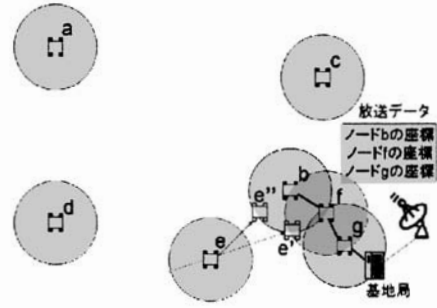


図 4: ノードの目的地更新

から収集フェーズに移行し、基地局から放送されるデータを基に、基地局と通信できる地点で自身に最も近い地点 (b', e') を決定して移動を開始する。ノード b が先に目的地点に到着すると、基地局より放送されるデータが更新され、ノード e は、より近い目的地 e'' を決定して移動する。このように収集ネットワークへ参加する際には随時目的地点を更新することで、移動距離を低減する。

以下に各フェーズにおけるノードの動作を詳細に説明する。なお、ノード SN_i ($0 < i \leq m$) の現在位置 (ベクトル) を \mathbf{p}_i 、ノードの通信範囲の半径を R 、基地局 BS の位置を \mathbf{p}_{BS} 、収集ネットワークの参加ノード RN_j ($0 < j \leq n, n \leq m$) の位置を \mathbf{r}_j とする。

1. センシング地点に到着したノード SN_i はセンシングを開始する。(観測フェーズ)
2. 観測データのサイズが D に達すると、観測フェーズから収集フェーズに移行する。
3. 基地局から放送される収集ネットワーク内のノード位置情報から、 $|\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_i|$ が最小となる自身と最も近いノード RN_k を検索する。そして、そのノードと通信できる位置 \mathbf{p}_{dst_i} を次式を用いて決定し、それに向かって移動する。

$$\mathbf{p}_{dst_i} = \frac{R}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{p}_i|} \mathbf{p}_i + \frac{|\mathbf{r}_k - \mathbf{p}_i| - R}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{p}_i|} \mathbf{r}_k \quad (1)$$

収集ネットワークにノードが存在しない場合は、 \mathbf{p}_{BS} を用いて \mathbf{p}_{dst_i} を算出する。

4. 収集ネットワークにノードが追加される度に放送されるデータが更新されるため、ノードは随時放送を監視しデータが更新されれば、手順3によって \mathbf{p}_{dst_i} を更新する。
5. \mathbf{p}_{dst_i} に到着するとノード RN_k に対して、センシングデータの送信を開始する。

6. 収集ネットワークに参加中に他のノードからデータを受信した際には、自身のセンシングデータを送信した後、データ中継を開始する。
7. すべてのノードが収集ネットワークに参加するまでは、自身のセンシングの送信および中継データの送信が完了していても、その場で待機する。
8. すべてのノードが収集ネットワークに参加したことが放送データから分かると、データの送信が終了しているノードはセンシング地点へ移動を開始する。

4 性能評価

シミュレーション実験によって提案手法の性能評価を行った。以下、その結果および考察について述べる。

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。観測領域を 2,000m 四方の 2 次元平面とし、基地局を領域の 1 つの角に配置した。ノードの数を 400 とし、それぞれ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。ノードの移動速度を 1 m/s、無線通信範囲を 50m、無線通信速度を 2Mbps とした。1 回のセンシングに必要な時間を 1,000 秒とし、5M ビットのデータを収集する。ノードの移動コストを 1 J/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。

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

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

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]
基地局の位置	領域の角
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]
1回のセンシングで 収集するデータ量	5 [Mbit]
移動コスト	1 [J/m]
送信コスト	$(k \cdot 50) + (0.1 \cdot k \cdot d^2)[nJ]$
受信コスト	$k \cdot 50[nJ]$
シミュレーション時間	30,000[秒]
k :送受信するデータ量 [bit], d :送信距離 [m]	

k は送受信データ量(ビット), d は送信距離(メートル)を表す。1回のセンシングデータを50メートル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[2], 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, ノードにおいて, データの送信と受信は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。

以上の環境において, 30,000秒経過後の性能を評価し, ノードのセンシング地点を変更して, 同様のシミュレーションを10回行った。

4.2 比較手法

実験では, P方式およびNB方式と性能を比較した。各方式の概要を次に示す。

P (Piston) 方式

ノードはセンシング地点と基地局と通信可能な地点の間を往復し, 基地局と直接通信することで, センシングデータを収集する。

NB (Non-Broadcast) 方式

ノードは基地局に向かって移動し, 基地局, または収集ネットワークの通信範囲に入った時点で停止し, センシングデータを送信する。SR方式と同様, すべてのノードがネットワークに接続した後, データの中継が完了したノードからセンシング地点へと移動する。SR方式では,

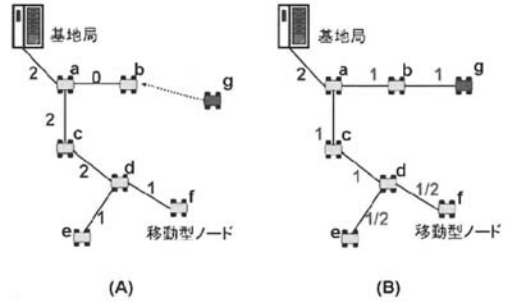


図 5: 通信速度の制御

各ノードが, 収集ネットワークにすべてのノードが接続したことを, プッシュ型放送によって知るのに対し, NB方式では, 基地局から収集ネットワークを通して知らされる。

4.3 通信方式

本節では, シミュレーションで用いた通信方式について述べる。

ノードの通信バッファの容量に制限がある場合を考慮し, センシングデータを中継する際, ノードの送信速度と受信速度が等しくなるように通信を制御する。ただし, 基地局ではこのような制限を考慮する必要がないため, 表1より, 基地局と直接通信するノードの間の通信速度は常に2Mbpsとする。

図5(A)に示す収集ネットワークがaからfの6つのノードで形成されているとする。ノード間の実線は無線リンクを示し, 実線上の数字は各ノード間の通信速度を表している。図中では, ノードbはデータの送信を終了しており, 通信速度が0となっている。ノードeとfがノードdに対して同時にデータを送信する場合, ノードa-c間, およびc-d間の通信速度は2Mbpsに設定されるため, ノードe-d, f-d間の通信速度の和は2Mbpsでなければならない。この場合, ノードeとfは等しい速度でノードdと通信するものとし, ノードe-d, f-d間の通信速度はそれぞれ1Mbpsに設定される。

次に, 図5(B)に示すようにノードgが新たに収集ネットワークに接続した場合, ノードbがデータ転送を行うため, ノード間の通信速度は図に示すように変更される。このような通信速度の変更はネットワーク内で即座に行われ, ノードは, ネットワークに接続した直後にデータの送信を開始できるものとする。

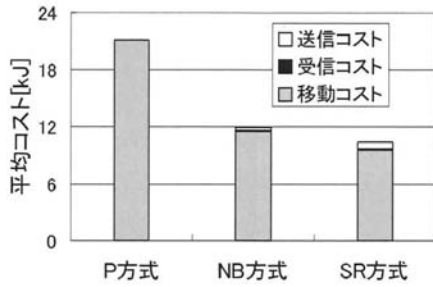


図 6: 平均コスト

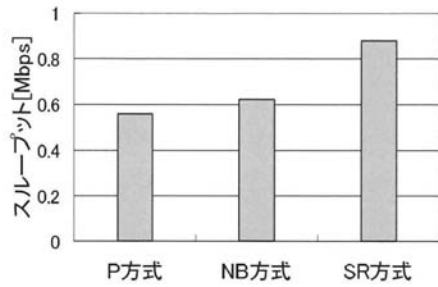


図 7: スループット

4.4 評価項目

シミュレーション実験では次の項目について評価した。

- 平均コスト

移動コスト，送信コスト，および受信コストのそれぞれノード 1 台あたりの平均。

- 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。

- 平均所要時間

シミュレーション中におけるセンシング時間，移動時間，通信時間，および待機時間の，ノード 1 台あたりの平均。通信時間は，データを転送した時間であり，待機時間は，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である。

4.5 平均コスト

平均コストを図 6 に示す。NB 方式の移動コストが P 方式と比較して大幅に減少している。NB 方式では，ノードが基地局とマルチホップ通信可能な位置で停止するため，ノードの移動距離が削減されるためである。これに対し，SR 方式の移動コストは NB 方式よりもさらに低減されている。SR 方式では，収集ネットワークに参加するノードの最新情報が，放送によって提供されるため，随時，移動距離が減少するように各ノードが自ら目的地を変更するためである。NB 方式と SR 方式の送信コストが P 方式に比べて大きくなっているが，これは，他のノードのデータを転送することで，ノード 1 台あたりのデータ転送量が増えるためである。

コストの大部分を移動コストが占めるため，SR 方式を適用した場合，移動コストの削減により，ノードのセンシング時間が増加することが期待できる。

4.6 スループット

スループットを図 7 に示す。センシング時間の増加により，SR 方式，NB 方式，P 方式の順にスループットが高くなっている。図 6 に示した結果とあわせて，SR 方式を適用した場合，放送を用いない 2 つの方式と比較して移動コストが減少し，かつスループットが増加することがわかる。このことから，放送を用いて収集ネットワークに参加しているノードの位置を提供することが有効であることが確認できる。

4.7 平均所要時間

平均所要時間を図 8 に示す。NB 方式，および SR 方式を適用した場合，P 方式に比べて移動時間が短く，ノードの移動距離が減少している。また，SR 方式，NB 方式，P 方式の順に通信時間が長くなっている。これは，平均コストと同様に，ノードが自身のセンシングデータだけを送信する P 方式に対し，NB 方式，および SR 方式では，他のノードのデータを中継するためである。また，データ中継の際に，1 つのノードに対して 2 つ以上のノードが同時にデータを送信する場合，4.3 節より，通信速度が低下するため，通信時間が長くなる。さらに，SR 方式の通信時間は NB 方式と比較して長いが，これは，SR 方式で形成されるネットワークでは，移動距離が短縮される一方で，ノードから基地局までの平均ホップ数が大きく，ノード 1 台あたりの中継データ量が増加するためである。

待機時間については，NB 方式，および SR 方式において発生するが，すべてのノードが基地局と直接通信する P 方式では発生しない。SR 方式を適用した場合の待機時間は NB 方式に比べて短くなっている。ノードの移動距離が削減されることにより，すべてのノードがネットワークに接続するまでの時

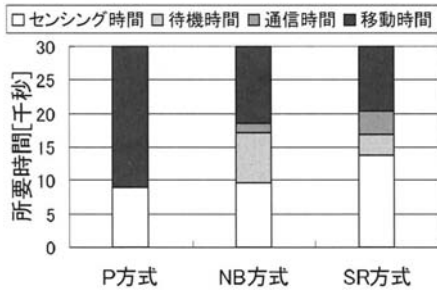


図 8: 平均所要時間

間が短くなるためである。待機時間が短縮されることにより、SR方式を適用した場合、ノードがセンシングへ向かう頻度が高くなる。その結果、センシング時間が長くなり、基地局に多くのデータを収集することができる。

5 まとめ

本稿では、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、基地局とマルチホップ通信可能な位置をプッシュ型放送を用いて放送する移動制御手法を提案した。また、シミュレーション実験により、提案手法を用いることで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。

今後は、提案手法を改良しノードの移動コストをさらに削減するとともに、ノードが複数の地点でセンシングを行うモデルを検討する予定である。さらに、本稿では考慮しなかった放送の受信に要するコストを評価する必要がある。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ネットワークの共生環境を築く情報技術の創出」、文部科学省若手研究 (A)(16680005)、および基礎研究 (A)(17200006) 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. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2001)*, pp. 2033–2036 (2001).
- [2] D. K. Goldenberg, J. Lin, A. S. Morse, B. E. Rosen, and Y. R. Yang, "Towards mobility as a network control primitive," in *Proc. ACM Inter-*

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

- [3] 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. the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1143–1148 (2002).
- [4] 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).
- [5] T. A. Dahlberg, A. Nasipuri, and C. Taylor, "Explorebots: A mobile network experimentation testbed," in *Proc. the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Experimental Approaches to Wireless Network Design and Analysis (EWIND 2005)*, pp. 76–81 (2005).
- [6] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. the Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1–10 (2000).