

無線センサネットワークにおけるモバイルシンクとの 接続状況に基づくデータ転送先の決定法について

山本彩奈^{†1} 近藤真也^{†1} 神崎映光^{†1}
原隆浩^{†1} 西尾章治郎^{†1}

本稿では, 無線センサネットワークにおいて, センシング対象となる領域内を自由に移動する多数のモバイルシンクが存在する環境下で, 効率的なデータ収集を実現するデータ転送先決定手法を提案する. 提案手法では, 各センサが, モバイルシンクが発信するビーコンの受信回数に基づき, 自身とモバイルシンクとの接続状況を把握する. また, 接続状況に関する情報を周辺のセンサと共有し, これを基に, モバイルシンクと直接通信できないセンサがデータ転送先を決定する.

On Selection of Data Forwarding Destinations Based on Status of Connection with Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks

AYANA YAMAMOTO,^{†1} SHINYA KONDO,^{†1}
AKIMITSU KANZAKI,^{†1} TAKAHIRO HARA^{†1}
and SHOJIRO NISHIO^{†1}

In this paper, we propose data forwarding methods for efficient data gathering in wireless sensor networks in which multiple mobile sinks freely move in the target region. In the proposed methods, each sensor node recognizes its status of connection with mobile sinks based on the number of received beacons transmitted by mobile sinks. In addition, sensor nodes share this information. Based on the shared information, each sensor node that cannot communicate directly with mobile sinks determines sensor nodes to which it forwards the data.

^{†1} 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
Dept. of Multimedia Eng., Grad. Sch. of Information Science and Technology, Osaka Univ.

1. はじめに

近年, 無線通信技術の発展やセンサの小型化に伴い, 無線通信機能を備えたセンサノード(以下, センサ)のみで構成される無線センサネットワークへの関心が高まっている²⁾. 無線センサネットワークでは, 各センサがセンシングと通信の二つの役割を果たすため, 多数のセンサを配置することで大規模な領域のセンシングが可能となる. このため, 無線センサネットワークは, 街中の環境把握や気象予測, 生態調査を始めとする, 様々な分野への応用が期待されている.

無線センサネットワークでは, データを集約するシンクノードを設置し, 各センサが観測した情報(以下, データ)を, マルチホップ通信を用いてシンクノードに転送することが一般的である. これまで行われてきた研究では, 単一のシンクノードを設置する環境を想定したものが大半である⁸⁾. このような環境において, 多数のセンサで大規模領域の観測を行う場合, 各センサからシンクノードまでの通信に多くの中継ノードを介する必要がある, パケットロス等の影響でデータ転送に失敗する可能性が高くなる. また, 全てのセンサがシンクノードにデータ転送を行うため, シンクノード付近において通信量が著しく増大し, パケットロスが頻発してしまう可能性がある. これらの問題を緩和するため, センシングの対象となる領域内を移動するシンクノードであるモバイルシンクを用いたデータ収集に関する研究が, 近年盛んに行われている^{6),10)}. モバイルシンクは, 領域内を移動しながら, 通信範囲内に存在するセンサから直接データを収集する. これにより, 各センサからシンクノードまでのデータ転送に要する通信量を削減できる.

モバイルシンクを導入した無線センサネットワークとして, 人や車, 動物, ロボットといった様々な移動媒体を想定した研究が行われている^{5),7)}. その大半が, モバイルシンクの移動が制御可能であること, もしくは移動経路が予測可能であることを想定している. 一方, カーナビゲーションシステムやスマートフォンといった無線通信機能を備えたデバイスが近年広く普及している. これらのデバイスは, 環境内に多数存在しているため, モバイルシンクとして活用することで, 各センサから効率よくデータ収集が行えるものと考えられる. 例えば, カーナビゲーションシステムをモバイルシンクとして利用する場合, 各センサは, 無線通信範囲内を通過するモバイルシンクに直接データを転送することで, 高信頼かつ低遅延なデータ転送が実現できる. しかし, カーナビゲーションシステムを搭載した車やスマートフォンを所持する人は領域内を自由に移動するため, 移動が制御できるモバイルシンクや, 移動経路が予測可能なモバイルシンクを想定した従来手法が適用できない. また,

車や人は、その移動に偏りが生じることが考えられる。例えば、モバイルシンクとして車を活用する場合は、移動範囲が道路上に限定され、その中でも幹線道路や交差点に集中して存在するものと考えられる。さらに、混雑する道路が時間帯によって異なるなど、その移動特性が時間的に変化する。

このような環境では、モバイルシンクと直接通信できないセンサが発生するものと考えられる。これらのセンサが取得したデータは、モバイルシンクへのマルチホップ通信によって転送する必要がある。その単純な方法として、各センサがフラッディングなどの無作為な方法でデータを転送することが考えられるが、多数のセンサが設置された環境では、通信量が増大し、通信帯域の圧迫によるデータ転送の失敗が頻発するものと考えられる。

そこで本稿では、環境内を自由に移動し、データ収集のための移動制御が不可能なモバイルシンクが多数存在する環境において、効率的なデータ転送を実現する手法を提案する。提案手法では、各センサが、モバイルシンクが定期的に発信するビーコンを受信した回数に基づき、自身とモバイルシンクとの接続状況を判断する。具体的には、ある期間内に十分な数のビーコンを受信している場合、センサは、自身の接続状況が良好であり、モバイルシンクへ直接データ転送が行えるものと判断する。さらに、各センサの接続状況に関する情報を隣接するセンサ間で共有する。モバイルシンクと直接通信が行えないセンサは、共有している接続状況に関する情報に基づき、データを転送するセンサを選択する。これにより、移動が制御できないモバイルシンクに対して、効率よくデータを転送できる。

以下では、第2章で関連研究について述べ、第3章で本研究の想定環境について述べる。第4章で、提案手法について述べ、第5章でシミュレーション実験により提案手法の性能評価を行う。最後に第6章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

無線センサネットワークにおいて、センサ間のデータ転送経路を構築する研究は、これまでに数多く行われている¹⁾。例えば、Directed Diffusion³⁾では、データを要求するユーザをシンクノードとし、要求されたデータを保持するセンサからシンクノードまでのデータ転送経路を形成する。この手法では、データ要求を行うシンクノードに向けて、データ転送経路を周辺のセンサが自律的に構築する。具体的には、まずシンクノードが特定のデータに対する要求をフラッディングする。要求を受信したセンサは、要求に一致するデータを取得した場合、要求が中継されてきた経路に沿って、該当するデータを隣接するセンサに転送する。データを受信したセンサが同様の操作を繰り返すことで、データがシンクノードに到達

する。シンクノードは、データが転送されてきた経路のうち、遅延が最小である最適な経路を選択し、それ以降に同様のデータを要求する際には、その経路を利用してデータを取得する。これにより、データの発生源であるセンサとシンクノードの間に一つの経路が形成される。この手法は、データの転送先となるシンクノードが任意の位置において発生する点で、移動が制御できないモバイルシンクへのデータ転送を行う本研究と類似している。しかし、本研究では、モバイルシンクはクエリを発行せず、データ収集とは無関係に移動し、各センサが能動的にデータの転送を行う。

一方、無線センサネットワークにおいて、自由に移動するモバイルシンクを導入した研究は、これまでにいくつか行われている。例えば、Fodor らの手法⁴⁾では、各センサが、通信範囲内に存在するセンサのうち、モバイルシンクが存在する方向にあるものの情報をリストとして保持することで、モバイルシンクを根とした木構造のネットワークを形成する。この手法では、各ノードがモバイルシンクごとに親ノードを保持する。各センサは、モバイルシンクが定期的に発信するパケットを受信し、そのパケットに含まれる情報が自身の保持する情報よりも新しい場合、それに対するリストを更新する。この手法は、モバイルシンクごとに個別に情報を管理するため、多数のモバイルシンクが頻繁に移動する場合、通信経路の維持、管理にかかる通信量が増大する可能性がある。

3. 想定環境

本章では、本稿で想定するモバイルシンクおよびセンサについて説明する。

3.1 モバイルシンク

本稿では、観測対象となる領域内に多数のモバイルシンクが存在する環境を想定する。各モバイルシンクは自由に移動するが、移動特性には偏りがあり、モバイルシンクが集中して存在する領域が時間的に変化するものとする。各モバイルシンクは定期的にビーコンを発信し、通信範囲内に存在するセンサからデータを収集する。

モバイルシンクが取得したデータは、携帯電話網を用いた集約や、車車間通信およびモバイルアドホックネットワークなどを用いた共有によって利用されるものとする。本稿では、モバイルシンクに到達したデータの集約・管理については扱わず、センサが取得したデータを、環境内に存在するモバイルシンクのいずれかに転送することを目的とする。

3.2 センサ

センサは観測対象となる領域内に多数配置されており、無線通信範囲に対して密に配置されているものとする。全センサは、計算能力、メモリ容量、通信範囲などにおいて同等の性

能をもつものとする。

各センサは、温度や湿度、交通量などといった環境情報を定期的に取得（センシング）し、取得したデータを自身の記憶領域に蓄積する。センサの記憶容量には制限があり、蓄積したデータがこの容量を超過した場合は、古いデータから破棄するものとする。また、センシングしたデータには生存時間が設定され、生存時間を超過したデータは破棄されるものとする。

各センサは、常に通信帯域を監視しており、通信範囲内に存在するセンサ（以下、隣接センサ）が送信したパケット、およびモバイルシンクが発信したビーコンを受信できるものとする。また、モバイルシンクが発信したビーコンを受信した際、自身の記憶領域内にデータが蓄積されている場合、そのデータをモバイルシンクに送信する。データを受信したモバイルシンクは、送信元のセンサに対し受信確認を返信し、この受信確認を受信した時点で、そのデータの転送は成功したものとみなす。

4. 提案手法

3.1 節で述べたとおり、提案手法では、領域内を自由に移動する多数のモバイルシンクのうち、任意の一つ以上にデータを転送することを目的とする。本稿で想定する環境では、全センサがモバイルシンクと直接通信可能であるとは限らない。そのため、各センサは、隣接センサ間で接続状況に関する情報を共有し、データ取得時に自身の通信範囲内にモバイルシンクが存在しない場合、共有している情報に基づいて、他のセンサにデータを転送する。

以下では、提案手法で用いる接続状況について述べた後、データの転送方法について述べる。

4.1 接続状況の認識

各センサは、モバイルシンクが発信するビーコンの受信頻度に基づき、自身の接続状況を認識する。具体的には、センサがモバイルシンクのビーコンを一定期間 T_b 内に受信した回数が予め定められた閾値 N_b を超えると、そのセンサはモバイルシンクと頻繁に通信可能である、すなわち、モバイルシンクとの接続状況が良好であると判断する。

また、各センサは、後述する共有手法によって転送先リストと呼ばれる情報を保持し、周辺のセンサにおける接続状況を把握する。転送先リストには、隣接センサの識別子、情報を取得した時刻、および接続状況が良好なセンサまでのホップ数を含む接続状況情報が格納される。各接続状況情報には生存時間が設定されており、生存時間を超過した情報は破棄される。

4.2 接続状況の共有

本稿の想定する環境では、モバイルシンクの移動によって接続状況が良好となるセンサが動的に変化するため、モバイルシンクへ効率よくデータを転送するためには、最新の接続状況情報を共有する必要がある。しかし、接続状況が変化するたびに新たな情報をセンサ間で交換すると、そのための通信に大きなトラヒックが発生する。特に、各センサにおけるセンシング頻度が小さいなど、データ転送の機会が少ない環境では、共有した接続状況情報がデータ転送に利用されず、接続状況情報共有のためのトラヒックが無駄になる可能性がある。そのため本稿では、接続状況情報をセンサ間で共有する手法として、データ転送時のみ接続状況情報を取得する要求型と、能動的に最新の接続状況情報を共有する通知型の二つの手法を提案する。

以下では、それぞれの手法について記述する。

4.2.1 要求型

要求型では、各センサにおいてデータ転送が必要になった場合に、 H_m ホップの範囲内に存在するセンサに接続状況情報を要求する。まず、データを保持するセンサは、自身の転送先リスト内に接続状況情報が存在しない場合、全隣接センサに接続状況要求パケットをブロードキャストする。接続状況要求パケットには、パケットの送信元であるセンサの識別子、送信元センサからのホップ数、およびパケットを中継するセンサのリストを含む。

接続状況要求パケットを受信したセンサは、自身の接続状況が良好でない場合、接続状況要求パケットに含まれるホップ数を1だけ増加させる。その後、ホップ数が H_m 未満である場合、受信したパケットに自身の識別子を追加し、全隣接センサにブロードキャストする。一方、自身の接続状況が良好であれば、接続状況要求パケットが転送されてきた経路を逆順に辿って接続状況応答パケットを返信する。接続状況応答パケットには、パケットの送信元であるセンサの識別子、パケットを返信した時刻、送信元センサからのホップ数、パケットの返送経路上に存在するセンサのリストを含む。

接続状況応答パケットを受信したセンサは、以下の手順に従って動作する。

- (1) 接続状況応答パケットを自身に転送した隣接センサに関する情報が転送先リストに含まれるか確認する。
- (2) 転送先リストに含まれている場合は、その接続状況情報の取得時間およびホップ数を更新し、生存時間を再設定する。
- (3) 転送先リストに含まれていない場合は、その隣接センサに関する情報を新たな接続状況情報として転送先リストに追加する。

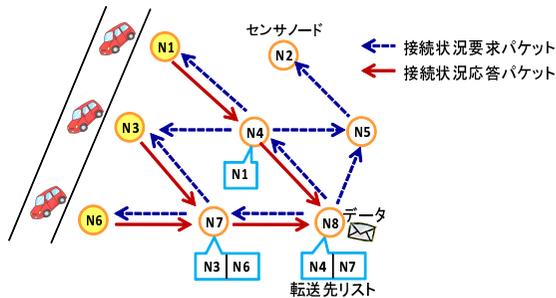


図 1 要求型における転送先リストの作成 ($H_m = 2$)

Fig. 1 Creating forwarding lists in the request-based method ($H_m = 2$).

- (4) 接続応答パケットに含まれるホップ数を 1 だけ増加させる。その後、ホップ数が H_m 未満である場合、返送経路上の次のセンサにパケットを転送する。

接続状況要求パケットの送信元であるセンサは、接続状況応答パケットを受信すると、4.3 節の手順に従って、保持しているデータの転送を開始する。

図 1 に、 $H_m = 2$ の場合の動作例を示す。図では、モバイルシンクである車が多く通過する道路に隣接するセンサ N_1 、 N_3 、 N_6 において、接続状況が良好となっている。この図において、データを保持しているセンサ N_8 は、接続状況要求パケットを自身から 2 ホップの範囲内にフラッディングする。接続状況要求パケットを受信したセンサのうち、自身の接続状況が良好であるセンサ N_1 、 N_3 、 N_6 は、接続状況要求パケットが転送された経路を逆順に辿って、接続状況応答パケットを返信する。接続状況応答パケットを受信したセンサ N_8 は、自身に接続状況応答パケットを転送した隣接センサである N_4 および N_7 に関する情報を、転送先リストに追加する。

4.2.2 通知型

通知型では、データ転送が必要かどうかにかかわらず、接続状況が良好なセンサが周辺のセンサに状況を通知する。まず、各センサは、一定期間 T_b ごとに、自身の接続状況を確認し、接続状況が良好である場合、接続状況通知パケットを全隣接センサにブロードキャストする。接続状況通知パケットには、パケットの送信元であるセンサの識別子、接続状況が良好であると判断した時刻、送信元センサからのホップ数、およびパケットを中継するセンサのリストを含む。

接続状況通知パケットを受信したセンサは、要求型において接続状況応答パケットを受信

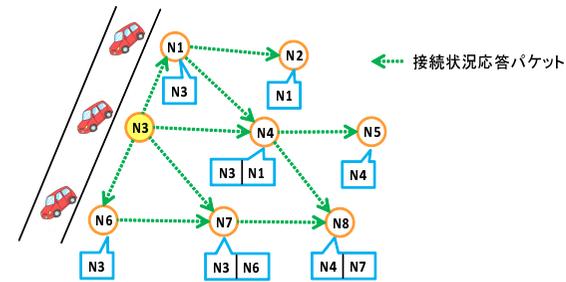


図 2 通知型における転送先リストの作成 ($H_m = 2$)

Fig. 2 Creating forwarding lists in the advertisement-based method ($H_m = 2$).

した場合と同様の手順によって、自身の転送先リストを更新する。その後、接続状況通知パケットに含まれるホップ数を 1 だけ増加させ、ホップ数が H_m 未満である場合、受信したパケットに自身の識別子を追加し、全隣接センサにブロードキャストする。

図 2 に、 $H_m = 2$ の場合の動作例を示す。図では、センサ N_3 が自身の接続状況が良好であると判断し、接続状況パケットを 2 ホップ先までフラッディングする。接続状況パケットを受信したセンサ N_7 は、接続状況パケットを転送してきた隣接センサ N_3 および N_6 を転送先リストに追加する。さらに、センサ N_7 は、受信した接続状況パケットをブロードキャストし、これを受信したセンサ N_8 はセンサ N_7 を転送先リストに追加する。

4.3 データの転送

データを取得したセンサは、自身の転送先リストを用いてデータを転送する。ここで、提案手法では、取得したデータごとに k 個の複製を生成し、転送する。これは、センサノード間で共有している接続状況は必ずしも最新のものではなく、データを転送した先にモバイルシンクが存在する確証がないためである。そのため、データの複製を複数生成し、ネットワーク内に伝播させることで、そのうちいずれかがモバイルシンクに到達する可能性を向上させる。

以下に、各センサノードの具体的な動作について述べる。

- (1) データを取得したセンサは、モバイルシンクからのビーコンを最後に受信してから経過した時間がビーコンの発信間隔以内であれば、通信範囲内にモバイルシンクが存在すると判断し、モバイルシンクへデータパケットを送信する。ここで、データパケットには、データを取得したセンサの識別子、データを取得した時刻、データの送信元

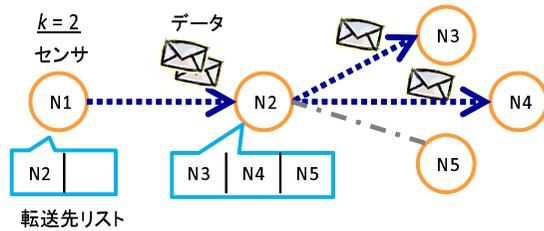


図3 データの転送（接続状況情報数が k 未満の場合）

Fig.3 Data forwarding (when the number of nodes with good connection status is less than k).

からのホップ数、データの複製の個数を含む。なお、ここでは、複製の個数は1に設定する。データパケットの送信に成功した場合は、自身の記憶領域からデータを削除し、転送処理を終了する。

- (2) モバイルシンクへの送信が行えなかった場合、自身のもつ転送先リストを参照する。
- (3) 転送先リストに k 個以上の接続状況情報が存在する場合、それらのうちホップ数が小さい k 個を選択する。なお、ホップ数が等しい情報が複数存在する場合は、その中から一つをランダムに選択する動作を、選択した情報の総数が k になるまで繰り返す。その後、選択した情報に対応する隣接センサに、データパケットを送信する。このとき、すべてのデータパケットに対し、複製の個数は1に設定する。
- (4) 転送先リスト内の接続状況情報が k 個未満である場合、転送先リスト内の情報全てに加えて、総数が k 個になるまで再度転送先リストからランダムに選択する。その後、選択した情報に対応する隣接センサに、データパケットを送信する。このとき、各隣接センサに送信するデータパケットに含まれる複製の個数には、その隣接センサを選択した回数を設定する。
- (5) 転送先リストに接続状況情報が存在しない場合は、自身の記憶領域にデータを保持する。モバイルシンクと直接接続するか、接続先リストに新たな情報が追加された場合、上記の手順に従ってデータパケットを送信する。

データパケットを受信したセンサは、以下の手順に従って動作する。

- (1) データを取得したセンサと同様、自身の通信範囲内にモバイルシンクが存在するか確認し、存在すると判断した場合は、モバイルシンクへデータパケットを送信する。送信に成功した場合は、自身の記憶領域からデータパケットを削除し、転送処理を終了する。

- (2) モバイルシンクへの送信が行えなかった場合は、自身の持つ転送先リストを参照し、上記のデータを取得したセンサの手順(3)~(5)に従い、受信したデータパケットに含まれる複製の個数と等しい数のデータパケットを隣接センサに送信する。

この動作例を図3に示す。図では、 $k=2$ であり、データを取得したセンサ N_1 が、モバイルシンクへのデータパケット送信に失敗している。まず、センサ N_1 は、自身の転送先リストを参照するが、リスト内の接続状況情報が1個 ($< k$) しか存在しないため、複製の個数を $2(=k)$ に設定したデータパケットを隣接センサ N_2 に送信する。データパケットを受信したセンサ N_2 は、自身の転送先リストを参照し、複製の個数に等しい二つの情報を選択する。その結果、隣接センサ N_3 および N_4 にデータパケットが転送される。

5. 性能評価

本章では、ネットワークシミュレータ QualNet4.0⁹⁾ を用いて行ったシミュレーション実験の結果を示し、提案手法の有効性を検証する。実験では、街中の環境を把握するための情報を取得するセンサノードからデータを収集する環境を想定する。

5.1 評価環境

実験では、 $300[m] \times 300[m]$ の二次元平面上に400個のセンサをランダムに配置した。センサは、2[分]ごとにデータを取得し、取得するデータのサイズは50[byte]とした。センサとモバイルシンクの通信半径は共に20[m]とした。

各センサは、データ10個分の記憶領域をもつものとした。提案手法において接続状況を確認する期間 T_b は10[秒]とし、データおよび接続状況に関する情報を転送するホップ数制限 H_m は4とし、送信するデータパケットの複製数 k は2とした。各センサは、受信した接続状況情報を10秒間保持し、それを経過した場合、破棄する。

モバイルシンクは30台存在するものとし、シミュレーション時間は30[分]とした。モバイルシンクは、シミュレーション開始時に図4(a)における点線で囲まれた九つの領域内にランダムに配置した。各モバイルシンクは、移動範囲の点線で囲まれた九つの領域のうち、自身の存在する領域、もしくは隣接する上下左右の領域内からランダムに次の目的地を選択し、 $[10, 20][m/秒]$ の範囲内でランダムに選択した速度で直線的に移動する。目的地に到着したモバイルシンクは、3秒間停止した後、次の目的地へ移動する動作を繰り返す。また、モバイルシンクの移動特性を変化させるため、シミュレーション開始から15分後に、目的地の候補となる領域を図4(b)に示す4箇所に変更させた。

上記の環境において、提案手法の性能を、以下に示す手法と比較した。

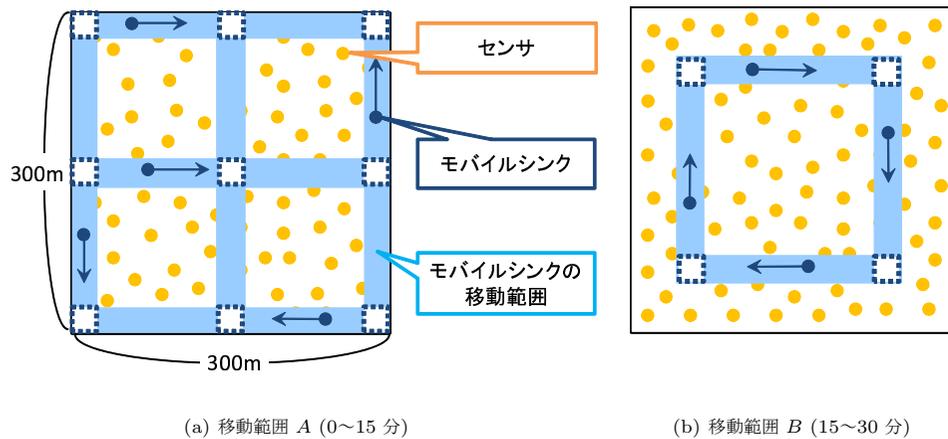


図 4 評価環境
Fig. 4 Simulation environment.

- **現在地通知手法**：ビーコンの受信回数に基づく接続状況を用いず、モバイルシンクと通信可能かどうかを周辺ノードに逐一通知する手法である。各センサノードは、モバイルシンクが発信したビーコンを受信すると、提案手法における通知型と同様、自身から H_m ホップの範囲内に接続状況通知パケットと同様の情報を含むパケットをフラッディングする。このパケットを受信したセンサノードは、提案手法における通知型と同様、自身の転送先リストにその情報を追加する。
一方、モバイルシンクと通信可能であることを通知したセンサノードは、常にビーコンの受信状況を監視し、ビーコンの発信間隔が経過してもビーコンを受信できなくなった場合、モバイルシンクとの接続が切断したことを検出し、そのことを通知するパケットを H_m ホップの範囲内にフラッディングする。このパケットには、接続状況通知パケットと同様の情報を含む。このパケットを受信したセンサノードは、対応する情報を自身の転送先リストから削除する。
データ取得時は、提案手法と同様、転送先リストから選択した k 個の隣接センサにデータを転送する。
- **k ランダム転送手法**：センシングを行ったセンサノードは、接続状況を考慮せず、デー

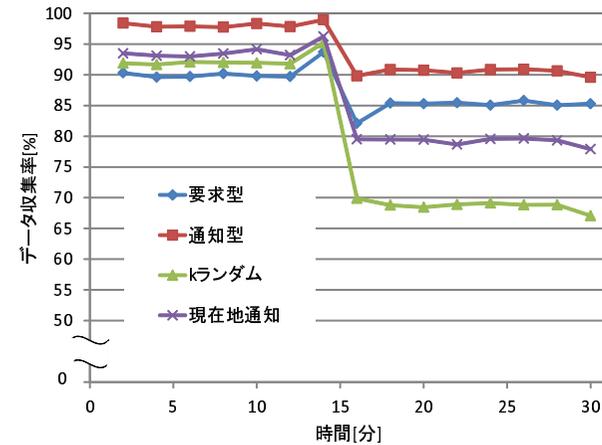


図 5 データ収集率
Fig. 5 Data gathering ratio.

タパケットの複製 k 個をランダムに送信する。この手法では、接続状況情報の共有を行わないため、各センサノードは転送先リストを作成しない。また、データ転送時の手順は基本的に提案手法と同等であるが、データパケットの転送先は、全隣接センサの中からランダムに選択する。

5.2 評価指標

シミュレーション実験では、20 回の実験を行い、以下の指標の平均値を評価した。

- **データ収集率**：過去の 2 分間に発生したデータのうち、いずれかのモバイルシンクに収集されたものの割合。
- **トラフィック**：過去の 2 分間において送信されたメッセージサイズの総和。

5.3 データ収集率

データ収集率に関するシミュレーション結果を図 5 に示す。グラフの横軸は、実験開始からの経過時間を表す。

まず、シミュレーション開始から 15 分の時点までは、全手法におけるデータ収集率が概ね 90% を超えており、多くのデータ転送に成功していることがわかる。これは、図 4(a) に示すとおり、領域全体に対してモバイルシンクの移動範囲が占める割合が高く、モバイルシンクと直接通信できるセンサの数が多いためである。特に通知型は、他の手法と比較して

データ収集率が最も大きい。これは、データ転送の有無にかかわらず、常に接続状況情報を更新することで、接続状況の良好なセンサを介したモバイルシンクへのデータ転送がより確実に行われたためである。現在地通知手法は、モバイルシンクと接続可能なセンサが周辺のセンサに通知を行うが、データ転送の間にモバイルシンクが移動してしまう可能性が高く、通知型と比較してデータ収集率が低下する。一方、要求型におけるデータ収集率は、他の手法より小さくなる。これは、モバイルシンクの移動範囲が広い場合、モバイルシンクが移動範囲内に散在することになり、モバイルシンクと直接接続可能な位置に存在するセンサにおいて、接続状況が良好となる期間が限定されるためである。この場合、データ転送要求があった時点で、これらのセンサにおいて接続状況が良好でなく、接続状況要求パケットに対する返信が行われない可能性が高くなる。そのため、各センサが保持する接続状況情報数が減少し、データの転送が適切に行われなくなる。

次に、モバイルシンクの移動特性が変化した後、全手法においてデータ収集率が減少している。これは、図 4(b) に示すとおり、移動特性の変化前と比較してモバイルシンクの移動範囲が狭くなり、直接モバイルシンクと通信可能であるセンサの数が減少したためである。特に、 k ランダム転送手法は、モバイルシンクと直接接続できるセンサにデータが転送される機会が減少し、データ収集率が大きく減少している。これに対し、提案手法である要求型および通知型は、移動特性の変化後も、他の手法よりデータ収集率を高く維持できている。これより、提案手法は、モバイルシンクの移動特性に応じて、適切なデータ転送が行われていることがわかる。

ここで、モバイルシンクの移動特性が変化する時点において、全手法におけるデータ収集率が一旦増加している。これは、モバイルシンクの移動先が変化し、図 4(b) の範囲内におさまるまでの間、モバイルシンクが領域内に万遍なく存在することになり、各センサがモバイルシンクに直接データを転送できる可能性が高くなるためである。

また、要求型におけるデータ収集率が、移動特性変化直後に大きく減少し、その後増加している。これは、移動特性が変化した直後において、各ノードが保持する接続状況情報が更新されず、接続状況が良好でないセンサにデータパケットが転送される可能性が増加するためである。一方、通知型は、移動特性の変化に伴い、接続状況が良好となったノードが逐一接続状況通知パケットを発信し、各ノードの接続状況情報が迅速に更新されるため、データ収集率の減少が小さく抑えられる。

5.4 トラフィック

トラフィックに関するシミュレーション結果を図 6 に示す。グラフの横軸は、実験開始から

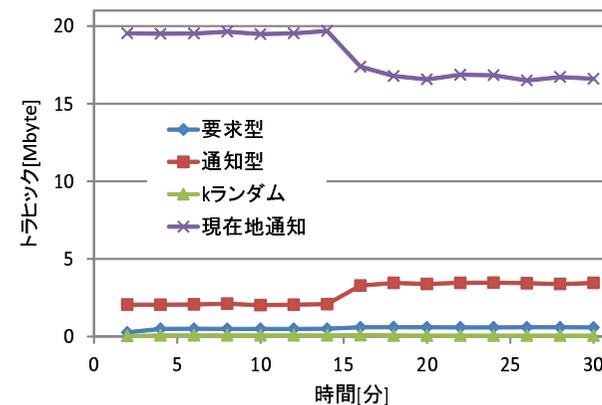


図 6 トラフィック
Fig. 6 Traffic.

の経過時間を表す。

結果より、現在地通知手法のトラフィックが、他の手法と比較して非常に大きくなることがわかる。これは、各センサにおいて、モバイルシンクとの接続・切断が頻発し、多くの制御パケットがフラッディングされたためである。これに対し、提案手法はトラフィックを大幅に削減しており、特に要求型におけるトラフィックが小さくなることがわかる。これは、評価環境におけるセンシングの頻度が比較的小さく、要求型における接続状況要求パケットがフラッディングされる機会が少なかったためである。

また、移動特性の変化に伴って、現在地通知手法におけるトラフィックが減少している。これは、移動特性の変化によって、モバイルシンクと直接通信できるセンサ数が減少し、制御パケットを発信するセンサ数が減少したためである。さらに、移動特性の変化によって、モバイルシンクの移動範囲が狭くなり、移動範囲内を多くのモバイルシンクが通過するため、その周辺に存在するセンサが絶えずビーコンを受信でき、接続の切断を検出する機会が減少することも、トラフィックが減少した要因として考えられる。一方、通知型におけるトラフィックは、移動特性の変化に伴って増加している。ここで、移動特性が変化する前後において発信されたパケットの詳細を確認したところ、接続状況通知パケットの発信数が移動特性変化後に増加したことがわかった。これは、移動範囲内に多くのモバイルシンクが存在することで、その周辺に存在するセンサにおける接続状況が常に良好となったためであると考えられ

る。ここで、要求型および k ランダム転送手法においては、移動特性の変化による通信量の大きな増減は見られない。これは、要求型は接続状況をデータ送信時に要求するため、制御パケットの通信量がデータの発生頻度に大きく依存しており、モバイルシンクの移動特性の変化にはあまり影響を受けないためである。また、 k ランダム転送手法については、制御パケットを使用しないため、モバイルシンクの移動特性が変化しても通信量は変わらない。

5.5 考 察

以上の結果より、提案手法によって、他手法と比較して、トラフィックを抑制しつつ、データ収集率を向上させていることがわかる。通知型は、他の手法と比較して高いデータ収集率を維持し、本稿の評価環境において有効に機能することがわかる。一方、要求型は、現在地通知手法よりも高いデータ収集率を示しながら、トラフィックを大幅に削減できることがわかる。ここで、センシングの頻度および取得するデータサイズが要求型の性能に影響を与える可能性がある。また、本稿の評価環境では、取得するデータサイズが比較的小さいため、制御パケットによるトラフィックがデータパケットと比較して非常に大きい。これに対し、取得するデータサイズが大きい環境では、データパケットの転送にかかるトラフィックが増大し、ネットワーク全体のトラフィックやデータ収集率に影響を与えるものと考えられる。

6. おわりに

本稿では、移動制御が不可能な多数のモバイルシンクが存在する環境において、効率的なデータ転送を実現する手法を提案した。提案手法では、モバイルシンクが発信するビーコンの受信頻度に基づく接続状況をセンサノード間で共有し、これを用いてデータの転送先を決定する。これにより、モバイルシンクとの接続状況が良好なセンサノードに向けてデータが転送され、データ収集率が向上する。

さらに本研究では、シミュレーション実験による性能評価を通して、モバイルシンクとの接続・切断を逐一報告する手法や、ランダムにデータ転送先を決定する手法と比較して、提案手法によりモバイルシンクへのデータ転送を効率よく行えることを確認した。

5.5節で述べたとおり、提案手法の性能は、センシングの頻度やデータサイズによって影響を受けるものと考えられる。今後は、これらの影響をシミュレーション実験によって評価し、提案手法の特性を詳細に調査する予定である。

また、4.1節で述べたとおり、通知型と要求型には、それぞれ有効な環境が存在すると考えられる。そのため、モバイルシンクの移動頻度や、データの取得頻度に応じて、転送先リストの生成方法を適応的に切り替える手法について検討する。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(S)(2122002)および若手研究(B)(23700078)の研究助成による成果である。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol.3, no.3, pp.325–349 (2005).
- 2) I.F. Akyidiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E.Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communication Magazine*, vol.40, no.8, pp.102–114 (2002).
- 3) C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," *Proc. ACM MobiCom 2000*, pp.56–67 (2000).
- 4) K. Fodor and A. Vida'cs, "Efficient routing to mobile sinks in wireless sensor networks," *Proc. Int. Conf. on Wireless Internet (WICON 2007)*, pp.1–7 (2007).
- 5) B. Kusy, H. Lee, M. Wicke, N. Milosavljevic and L. Guibas, "Predictive QoS routing to mobile sinks in wireless sensor networks," *IPSN 2009*, pp.109–120 (2009).
- 6) J. Luo, J. Panchard, M. Piorkowski, M. Grossglauser and J.-P. Hubaux, "MobiRoute: routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks," *Proc. IEEE Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 2006)*, pp.10–11 (2006).
- 7) M. Ma and Y. Yang, "SenCar: an energy-efficient data gathering mechanism for large-scale multihop sensor networks," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, vol.18, no.10, pp.1476–1488 (2007).
- 8) S.J. Park, R. Vedantham, R.Sivakumar and I.F.Akyildiz, "A scalable approach for reliable downstream data delivery in wireless sensor networks", *Proc. ACM MobiHoc 2004*, pp.78–89 (2004).
- 9) Scalable Network Technologies: Creators of Qualnet Network Simulator Software, <<http://www.scalable-networks.com/>>.
- 10) W. Seino, S. Sakashita, T. Yoshihisa, T. Hara and S. Nishio, "A communication protocol to improve fairness and data amount on sensor data collection with a mobile sink," *Proc. of Int'l Conf. on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2010)*, pp.33–40(2011).