

## マルチシンクセンサネットワークにおける 単方向型データ収集方式の提案

田中 篤史<sup>†1,\*1</sup> 屋代 智之<sup>†1</sup>

センサネットワークは、特定の範囲でのデータ収集を低コストで行うことができるため、様々な分野での利用が期待されている。センサネットワークを実現するうえで最初にあげられる課題は省電力である。特に、データ収集にともなう行われる無線通信は消費電力が大きく、その抑制は有効性が高い。センサネットワークでは、「シンク」と呼ばれるネットワークを管理するノードへ向けて、各センサが無線マルチホップ通信を利用し、自身が観測したデータを送信することでデータを収集する。そのため、シンクに近いセンサほどデータ中継の頻度が高くなり、バッテリー枯渇が早期に発生する。この問題の解決策として、複数のシンクを利用することで、シンク付近のデータ中継回数を分散し、データ収集が可能な時間を長期化する方式が考えられている。これに対して本論文では、このような複数のシンクを有するセンサネットワークにおいて、各シンクから他のシンクへ向けてデータ収集の要求と実行を同時に行うことでシンク近傍のセンサがデータ中継を行う頻度を低減することにより、局所的なバッテリー消費を抑制し、ネットワーク生存時間を長期化する方式を提案する。計算機シミュレーションを用いて提案方式の有効性を評価した結果、従来方式に比べてネットワーク生存時間が長期化することが分かった。このことより、提案方式は電力を効率良く利用してデータ収集を行っているといえる。

### A Proposal of Simplex Data Collection Method in Wireless Sensor Networks with Multiple Sinks

ATSUSHI TANAKA<sup>†1,\*1</sup> and TOMOYUKI YASHIRO<sup>†1</sup>

A sensor network is expected to use in various fields, since it can collect the physical or environmental conditions observed inside the specific area with low cost. The first subject to realize sensor network system is the battery lifetime of each sensor. The reduce of wireless communications for data collection is effective to enhance the lifetime, because these energy consumptions are relatively large. In a sensor network, special node called "sink" manages the network and collects the data observed by each sensor by using wireless multihop communication. Therefore, the node adjacent to the sink relays many of the data

and thus the battery of the node exhaust faster. This causes serious problem for the sensor network since the observed data can not reach to the sink node. To solve the problem, some methods to prolong the network lifetime by using multiple sink are proposed. In these methods, the number of nodes which can relay data to the sinks increases and the routes to the sinks are distributed. In this paper, we propose a method to prolong the network lifetime by performing a new request which is co-executed with data collection using multiple sinks to reduce the communication traffic. By the co-execution of requests and collection, the battery consumption of the node adjacent to the sink can be reduced. We evaluate the proposed method by simulations and show that the proposed method prolongs the network lifetime compared with conventional method.

#### 1. 序 論

「ユビキタスネットワーク社会」という言葉で形容されるように、インターネットをはじめとしたネットワークへ「いつでも、どこでも、誰でも、何でも」接続できることにより、様々なサービスの恩恵を受けることができる社会になってきている。さらには、無線通信技術の発展、モバイル端末の機能向上により、大容量データを容易に扱えるようになった。そのため、ネットワークを利用したサービスの利便性は飛躍的に向上し、ネットワークが日常生活にますます浸透してきている。このようなユビキタスネットワーク社会の実現を背景に、センサネットワーク技術が注目を浴びている。

本論文の目的は、センサネットワークにおいてデータ収集を行う際の省電力化である。データ収集にともなう行われる無線通信は、他の動作に比べて消費電力が非常に大きく、それを抑制することは省電力化を促進するうえで有効だと考えられる。

センサネットワークでは、各センサが無線マルチホップ通信を利用し、「シンク」と呼ばれる管理ノードへ向けて観測データを送信することでデータ収集を行う。そのため、シンクに近いセンサほどデータ中継の頻度が高くなり、バッテリー枯渇が早期に発生する。この問題の解決策として、複数のシンクを利用することでシンク付近のデータ中継の回数を分散し、データ収集が可能な時間（ネットワーク生存時間）を長期化する方式が提案されている<sup>1)-6)</sup>。

本論文では、複数のシンクを有するセンサネットワーク（マルチシンクセンサネットワー

<sup>†1</sup> 千葉工業大学

Chiba Institute of Technology

\*1 現在、株式会社クロスキャット

Presently with CrossCat Co., Ltd.

ク)において、各シンクから他のシンクへ向けてデータ収集の要求と実行を同時に行うことで、データ収集にともなう通信量を抑制し、ネットワーク生存時間を長期化する方式を提案する。また、計算機シミュレーションを用いて評価を行う。

## 2. 関連研究

センサネットワークでは、各センサノードが観測したデータを収集するためのプロトコルが必要となる。

MAC プロトコルとしては、LEACH<sup>7)</sup>のように TDMA を用いたもの、S-MAC<sup>8)</sup>のように無線 LAN で用いられているコンテンション方式を採用したものなどがある。

ルーティングプロトコルについても、すでに数多くの提案がなされている<sup>9)–12)</sup>。

ここではまず、単一のシンクを有するセンサネットワークにおけるデータ収集方式をあげる。

Directed Diffusion<sup>13)</sup>は、各センサノードからシンクまでの経路を1つだけにすることで冗長な通信を抑制し、消費電力の軽減を図る手法である。また、複数のセンサノードのデータを集約することで、通信におけるオーバーヘッドを削減することもできる。TAG<sup>14)</sup>ではネットワーク内集約方式を提案している。また、文献<sup>15)</sup>ではクラスタリングを用いてネットワーク生存時間の長期化を図っている。この方式では、観測領域上に配置されたセンサノードを物理的な位置などに応じてクラスタ化し、管理ノードは観測データをまとめてシンクへ送信する。

一方、複数のシンクを利用することでシンク付近のデータ中継の回数を分散し、ネットワーク生存時間の長期化を実現する方式も提案されている。

特に、各センサがネットワーク内に複数存在するシンクの中から、自身に最も近いシンクを選択して、そのシンクへ向けてデータを送信する方式が数多く提案されている<sup>1)–3)</sup>。以後、これらの方式を総称して NS (Nearest Sink) 送信方式と呼ぶ。NS 送信方式では、各センサが自身に最も近いシンクへ向けてデータを送信するため、シンクが単一であるセンサネットワークに比べ、センサからシンクまでのデータ中継の回数が少なくなり、データ収集にともなう通信量を抑制することが可能となる。

NS 送信方式によるデータ収集について説明する。まず、各シンクからデータ収集を要求するメッセージ(以後、REQ と呼ぶ)をネットワーク全体へフラディングする。REQ 内にはシンクからのホップ数が記憶されており、各センサは REQ を受信することで、各シンクまでのホップ数を把握する。そして、REQ の受信がトリガとなって、各センサは自身が

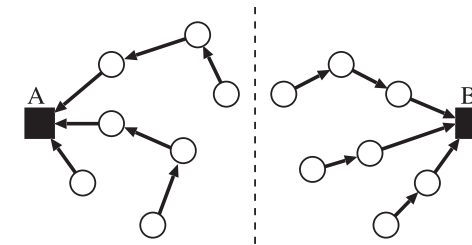


図1 NS 送信方式におけるデータ収集  
Fig. 1 Data collection on NS method.

観測したデータを格納したメッセージ(以後、REP と呼ぶ)をホップ数が最小であるシンクへ向けて送信する。図1は REQ を受信し各シンクへのホップ数を把握した後に、各センサ(図中の○)がシンク(図中の■)へ向けて REP を送信している様子である。図中央の点線は各シンクからのホップ数の境界を示しており、点線の左にあるセンサはシンク A が最もホップ数が小さく、右側はシンク B が最もホップ数が小さい。

O-DOP (Optimal DispersiveCast Of Packet)<sup>4)</sup>は、複数存在するシンクから1ホップ内に存在するセンサノードの負荷を均衡化するように送信先を選択することで、センサネットワークの生存時間を長期化する方式である。

DCMA (DispersiveCast of Packets to Avoid bottleneck nodes in using Multiple sinks)<sup>5)</sup>は、複数のシンクを用いたセンサネットワークにおいて、ボトルネックノードを考慮してネットワークの生存時間を延長させる方式である。

文献<sup>6)</sup>では、ネットワークをシンク数と同数のクラスタに分割し、それぞれのクラスタでデータ収集を行う。クラスタリングには蟻の群知能を利用することで、状況に適応したクラスタ形成を可能とする。

センサネットワークにおいてネットワーク生存時間を長期化するためのデータ収集方式には、ノード間の時刻同期やノードが自身の位置を知っていること、近隣のノードとクラスタを構成していることなどを前提として設計されているものが多い。しかし、これらはその動作を行うこと自体に電力を消費する。本論文では、データ収集にともなう通信のみを利用してネットワーク生存時間の長期化を目指す。

### 3. 単方向型データ収集方式

#### 3.1 想定環境

ある領域においてデータ収集を行うために、空中から散布するなどの方法を利用してセンサノードを配置する。生体反応を検知することが可能なセンサを利用した災害時の人命救助システムを例にとると、救助隊員が災害によって瓦礫と化した建造物の上にセンサノードをばらまき、救助を求めている人がいるかどうかをセンサネットワークを利用することによって把握することができると考えられる。センサノードの情報を集める手法として、各センサノードが定期的あるいは自律的に判断して情報をシンクに向けて送信する方法と、シンクからの問合せに応じて情報を送信する方法があるが、ここでは広範な情報を収集してから、全体的な状況を含めて判断することを考慮して、シンクからの問合せに応じて情報を送信する方法を想定する。このような環境では、すべてのセンサノードで生成された情報をシンクまで確実に配送することが重要である。このため、本論文では、センサノードにおいて生成した情報のうち、シンクまで配送されないで破棄される情報を極力減らすことを目標とする。

なお、センサノードが観測したデータの溜り場となるシンクを配置する場所は、図2の2通りが考えられる。

本論文では、観測領域内に踏み込んでシンクを配置することが困難であること、そして、データを収集するためのノードをあえて観測領域上に配置することはないと想定し、シンクはセンサノードが配置されている領域の外側に配置するものとした。

#### 3.2 提案方式

2章で説明したように、NS送信方式をはじめとする、センサネットワークにおけるデータ収集にともなう通信には、逆方向の通信であるREQとREPの2つが存在する。

つまり、1回のデータ収集は双方向で行われている。本論文では、各シンクから他のシンクへ向けて、REQとREPを同時に送信することで、単方向のみでデータ収集を行う方式を提案する。

各シンク、センサノードともに、それぞれを識別できるIDを保持しているものとする。また、シンクは有線もしくは無線LANなどを利用してネットワークを構成しており、シンク間の情報共有は容易にできるものとする。

各シンクは自身以外のシンクへ向けてREQをフラッディングする。各センサはREQを受信すると、REQに自身のREPを付加してから再度フラッディングを行う。REQとREPの送信を同時に行うことにより、従来のデータ収集方式よりも通信量が抑制され、ネット

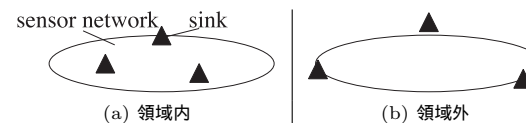


図2 シンクの位置  
Fig. 2 Sink position.

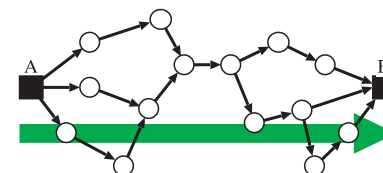


図3 提案方式におけるデータ収集  
Fig. 3 Data collection on proposed method.

ワーク生存時間を長期化することが可能になると考えられる。図3は、シンクAからシンクBへ向けてデータ収集を行っている様子である。

##### 3.2.1 REQのフラッディング

本方式では、従来のデータ収集方式と同様、各シンクから定期的にフラッディングされるREQによって、各センサノードに対してデータ収集の要求を行う。フラッディングの動作は、従来のデータ収集方式と同様、他のセンサノードから送信された同じREQを再び送信しないように、二重受信を検出する手法を利用する。具体的には、シンクがREQを生成する際に、REQにIDを付加する。このIDはシンクによって一元管理されており、同じIDは生成されないものとした。さらに、各センサノードは、自身が送信したことがあるREQのIDを記憶するリストを保持しており、受信したREQのIDがリストに存在した場合は送信を行わないようにする。すなわち、本方式でのフラッディングは、二重受信したセンサノードか他のシンクに到達するまで繰り返される。送信元以外のシンクの情報はREQの生成時にヘッダに付加される。

##### 3.2.2 REPの付加

各センサノードは、各シンクからのREQを受信すると、自身が観測したデータ(REP)をREQに付加し、送信元以外のシンクに到達するまでフラッディングする。これにより、従来のデータ収集方式とは異なり、各センサノードからシンクへの経路を構築せずにデータを収集することになる。また、各センサノードは自身が生成したREPに自身のIDを付加

表 1 シミュレーションパラメータ  
Table 1 Simulation parameters.

通信速度	250 kbps	初期電池容量	28 mAh
送信電力	0 dBm	送信消費電流	17 mA
通信半径	10 m	受信消費電流	19.7 mA

することで、どのセンサノードが観測したデータであるかを判断することができる。自身の REP を付加した REQ を送信する前に別の REQ を受信した場合には、それらをまとめて 1 つの REQ に付加して送信する。ここで、REQ 内に同じ ID を持つ REP が複数存在していた場合、それらを統合することにより、REQ に付加されている REP が冗長になるのを回避する。

### 3.3 評価

提案方式の有効性を示すために、計算機シミュレーションにより以下の項目の評価を行った。

#### ● データ到達率

データ到達率は、単位時間あたりにすべてのセンサで発生したデータ数に対する、単位時間あたりに全シンクが受信したデータ総数の比である。本論文では、単位時間を 600 秒とした。なお、データ到達率が 100% であるということは、センサノードが生成した情報がすべてシンクまで届いている、すなわち収集できていることを意味する。

#### ● ネットワーク生存時間

アプリケーションが要求するデータ到達率を維持している時間である。本論文では、生体反応を感知するセンサを利用した災害地における人命救助システムなど、すべてのセンサノードからのデータ収集が要求されるアプリケーションを想定し、データ到達率が 99% 以上の時間をネットワーク生存時間とした。

### 3.4 シミュレーション

シミュレーションパラメータを表 1 に示す。各パラメータは MICA MOTE の MICAz MRP2400J<sup>16),17)</sup> に基づいて設定した。実際は観測およびデータ処理といった動作においても電力を消費するが、ここではデータの送受信による電力消費のみを考慮した。また、初期電池容量については、データ到達率の推移を観測しやすくするために、本来(単 3 アルカリ乾電池 2 本、約 2000 mAh) の 1/70 倍に設定した。MAC プロトコルには CSMA/CA を利用した。なお、今回のシミュレーションにおいては、送信側端末での衝突は考慮しているが、ブロードキャスト時の隠れ端末による受信側での衝突は考慮していない。シミュレーションに用いるトポロジについては、図 4 に示す 4 通りとし、格子状配置では、シンクの

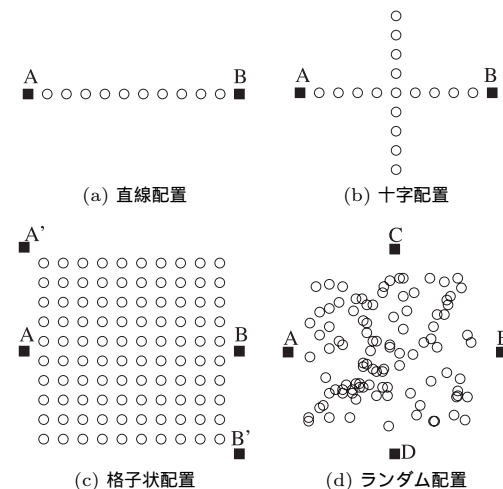


図 4 シミュレーショントポロジ  
Fig. 4 Simulation topology.

位置を A-B と A'-B' の 2 通りでシミュレーションを行った。ランダム配置とは、センサノードを空中などからばらまくことを想定し、シミュレーション範囲上において一定密度でランダムに配置したトポロジである。本論文では、50 m × 50 m のシミュレーション範囲に 100 台のセンサノードを一様乱数に従って配置する。この際、すべてのセンサノードとシンクがマルチホップで通信でき、孤立したノードが発生しないように乱数を選択した。このランダム配置では、シンクの位置を A-B, A-B-C, A-B-C-D の 3 通りでシミュレーションを行った。ランダム配置以外のトポロジでは、センサノードは 7 m 間隔の格子点上に配置されており、隣接する 8 方向のセンサノードと通信可能である。また、各センサノードは 60 秒ごとに観測を行っており、各シンクからフラッディングされる REQ の間隔は 300 秒とした。比較対象には文献 3) の手法を NS 送信方式として用いた。

### 3.5 結果

#### 3.5.1 直線配置におけるデータ到達率

直線配置におけるデータ到達率の推移を図 5 に示す。なお、以後の図も含めて、これらは 1 回のシミュレーションの結果である。ネットワーク生存時間は NS 送信方式が約 54 分、提案方式が約 65 分となり、提案方式が NS 送信方式よりも約 20% 長くなった。

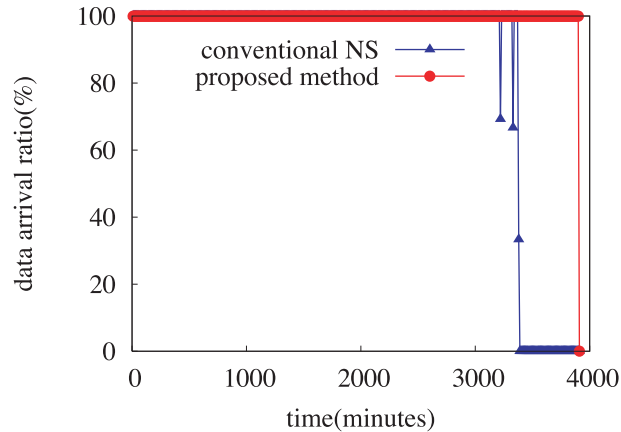


図 5 直線配置におけるデータ到達率  
Fig. 5 Data arrival rate on chain topology.

また、NS 送信方式においてデータ到達率が一時的に低下している箇所が見られる。これはシンク近傍のセンサノードのバッテリー枯渇により、観測データをシンクに送信できなくなったことが原因である。その後、データ到達率が再び上昇しているのは、反対側のシンクに送信するように経路情報が変更されるためである。

### 3.5.2 十字配置におけるデータ到達率

十字配置におけるデータ到達率の推移を図 6 に示す。図 6 より、提案方式のデータ到達率が 99% に至っておらず、ネットワーク生存時間は 0 となった。これは、中央上下端のセンサノードに到達した REQ がそれ以上中継されなくなるため、シンクまで REP が届かないことが原因である。到達率が安定していないのは、中央付近のセンサノードの REP が、中央のセンサノードに受信され、次のフラッディングのタイミングによって水平方向に中継されていく REQ に付加されてシンクに到達することが起こるためである。

### 3.5.3 格子状配置におけるデータ到達率

格子状配置におけるデータ到達率の推移を、シンクの位置が A-B の場合については図 7 に、A'-B' の場合については図 8 にそれぞれ示す。シンクの位置にかかわらず、十字配置と同様の理由で、提案方式のデータ到達率は 99% に到達していないことが分かる。

### 3.5.4 ランダム配置におけるデータ到達率

ランダム配置におけるデータ到達率の推移を、シンクの位置が A-B の場合についてのみ

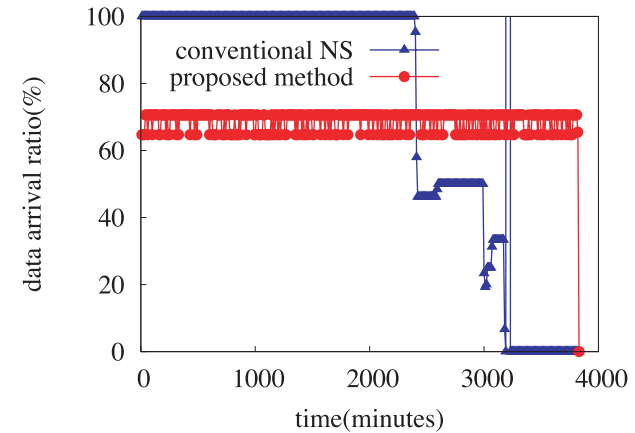


図 6 十字配置におけるデータ到達率  
Fig. 6 Data arrival rate on cross topology.

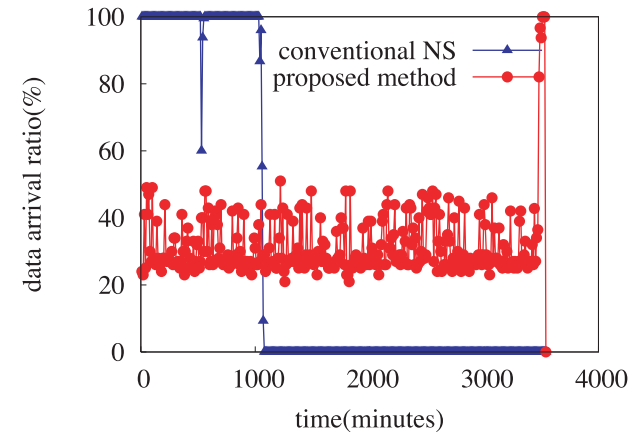


図 7 格子状配置におけるデータ到達率 (シンク A-B)  
Fig. 7 Data arrival rate on grid topology (sink A-B).

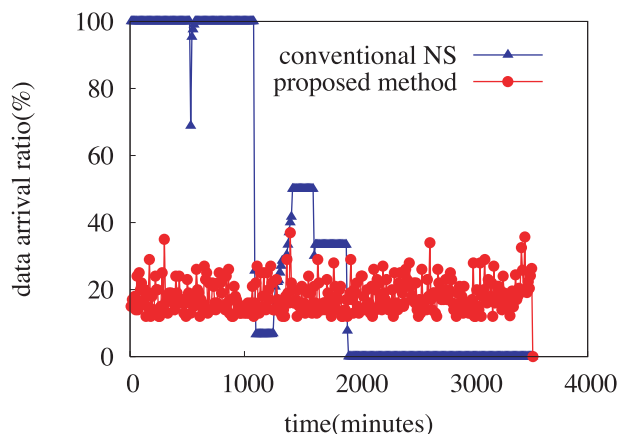


図 8 格子状配置におけるデータ到達率 (シンク A'-B')  
Fig. 8 Data arrival rate on grid topology (sink A'-B').

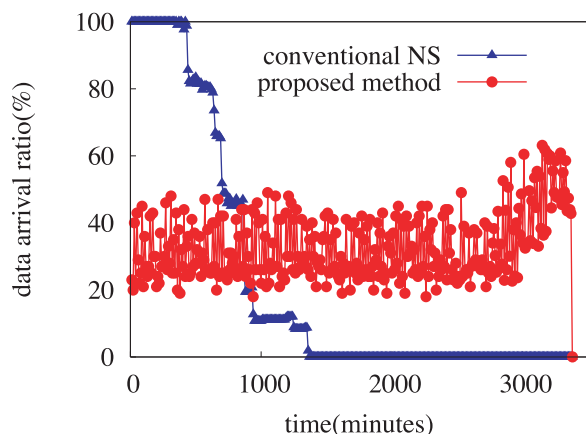


図 9 ランダム配置におけるデータ到達率 (シンク A-B)  
Fig. 9 Data arrival rate on random topology (sink A-B).

図 9 に示す。こちらでも十字配置，格子状配置と同様の理由で，提案方式のデータ到達率は 99% に到達していない。

### 3.6 考察

以上の結果から，直線配置においては提案方式のネットワーク生存時間が NS 送信方式に比べて長期化することが確認できた。一方，十字配置と格子状配置，ランダム配置においては，ネットワーク生存時間が 0 となってしまった。

すなわち，各シンクから他のシンクへ向けた単純な REQ のフラッディングのみでデータ収集を行うことは不可能であることが分かった。このため，従来のデータ収集方式と同様に，各センサノードが自らシンクへ向けてデータを送信する機構を追加する必要がある。4 章において，データ到達率を向上させるために提案方式の拡張を行う。

## 4. 単方向型データ収集方式の拡張と評価

本章では，3 章で提案した単方向型データ収集方式の問題を解決するための拡張を行う。

### 4.1 IndependentCast モードの導入

3 章で提案した単方向型データ収集方式では，REQ がネットワークの端で行き詰まってしまうために十分なデータ到達率を得ることができなかった。データ到達率を向上させるためには，各センサノードは必要に応じて自らシンクへ向けて REP を送信する必要がある。そのために，NS 送信方式と同様，自身から最も近いシンクへ向けて REP を送信する手法を用いる。

本論文において，センサノードが自らシンクへ向けて REP を送信する動作を IndependentCast (IC) モードと呼ぶこととする。また，IC モードに対して，3 章で提案した，各シンクから他のシンクへ向けてデータ収集を行う動作を提案方式の基本モードとして，以後，SimplexCast (SC) モードと呼ぶこととする。提案方式では，2 つのモードを状況に応じて使い分けることで，通信量を抑制しつつデータ到達率の向上を図る。

### 4.2 IC モードへの遷移

各センサノードは，自身が送信した REQ が中継されなかったと判断した場合，自律的に IC モードに遷移する必要がある。これを実現するために，提案方式では各センサノードが REQ を中継する際に，自身の ID と自身へ REQ を送信したノード (中継元) の ID を含めて送信する。各センサノードは REQ に付加された情報をもとにして，自身が送信した REQ が中継されたかを判断する。

図 10 を用いて，IC モードへの遷移の様子を説明する。図 10 (a) のようなネットワーク

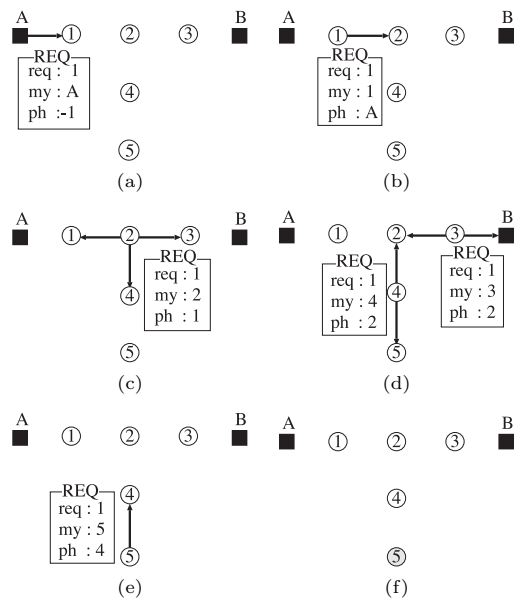


図 10 IndependentCast モードへの遷移  
Fig. 10 Transition to IndependentCast mode.

トポロジにおいて、シンク A からシンク B へ向けてデータ収集を行っているとする。図中の REQ 内に記されている req は REQ の ID, my は自身の ID, ph は中継元の ID をそれぞれ表している。REQ の中には他にシンクからのホップ数と REP のリストが含まれているが、ここでは表記を省略する。

- (1) シンク A から REQ が送信される。このとき、REQ の ID, 自身の ID, 中継元の ID を REQ のヘッダとして付加する。シンクの場合、中継元が存在しないため、-1 を設定している (図 10(a))。
- (2) シンク A からの REQ をセンサノード 1 が受信し、先ほどと同様にして、REQ のヘッダを書き換えてから送信する (図 10(b))。
- (3) センサノード 1 からの REQ をセンサノード 2 が受信、同様の手順を踏む (図 10(c))。
- (4) センサノード 2 が送信した REQ について、センサノード 1 は、REQ の ID から 1 度送信したことがあると判断し、破棄する。このときに自身が送信した REQ が中継

されたことを中継元の ID で確認する。センサノード 3 と 4 は、同様の手順で REQ のヘッダを書き換えてから送信する (図 10(d))。

- (5) センサノード 4 からの REQ をセンサノード 2 と 5 が受信するが、センサノード 2 はすでに送信している REQ のため破棄する。センサノード 5 は同様の手順で REQ のヘッダを書き換えてから送信する (図 10(e))。
- (6) センサノード 5 からの REQ をセンサノード 4 が受信するが、すでに送信している REQ のため破棄する。一定時間後、センサノード 5 は自身が送信した REQ が中継されていないと判断し、IC モードへ遷移する。IC モードではセンサノード 5 が保持するセンサノード 1, 2, 4, 5 のセンサ情報をシンクへ向けて送信する (図 10(f))。

このように、他のセンサノードによって中継された REQ および REP は、その中継したセンサノードがシンクに届ける処理を行うため、各センサノードは、自身が送信した REQ が中継されれば IC モードには遷移しない。中継されない場合には、REQ とともに自身に届けられた REP を含めて IC モードを用いてシンクへと送信する。

#### 4.3 IC モードにおけるルーティング

SC モードでは、各シンクから他のシンクへ向けた REQ のフラッディングに乗じて、各センサノードは REP をシンクへ向けて送信するため、センサノードからシンクへの経路を必要としない。しかし、IC モードでは、各センサノードが自らシンクへ向けて REP を送信するため、自身からシンクへの経路を必要とする。これについては、NS 送信方式と同様に、REQ のホップカウントに基づいたルーティングを利用する。各センサノードは REQ を受信すると、REQ の中継元との間に経路を構築する。そして、この経路を利用して REP を REQ の送信元シンクへ向けて送信する。また、電力消費の負荷分散を考慮して、各センサノードは送信先シンクに近い隣接センサノード群の中から、バッテリー残量が最も多いセンサノードを中継先として選択する。バッテリー残量の情報に関しては、各センサノードがデータを送信する際、ヘッダに含まれているものとし、各センサノードが MAC 層で取得するものとする。

#### 4.4 拡張後の評価

評価方法とシミュレーション条件については、それぞれ 3.3 節, 3.4 節に従う。また、センサノードの配置については、図 4 から直線配置を除いた 3 通りで評価を行う。

##### 4.4.1 十字配置におけるデータ到達率

十字配置におけるデータ到達率の推移を図 11 に示す。提案方式を拡張したことにより、データ到達率が 99% に達し、ネットワーク生存時間を計測できるようになっている。その

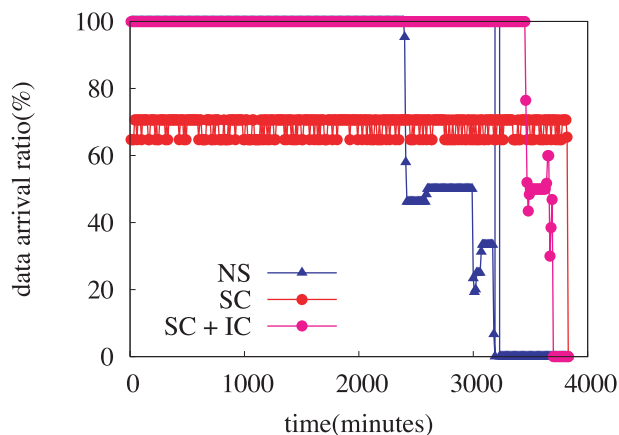


図 11 十字配置におけるデータ到達率  
Fig. 11 Data arrival rate on cross topology.

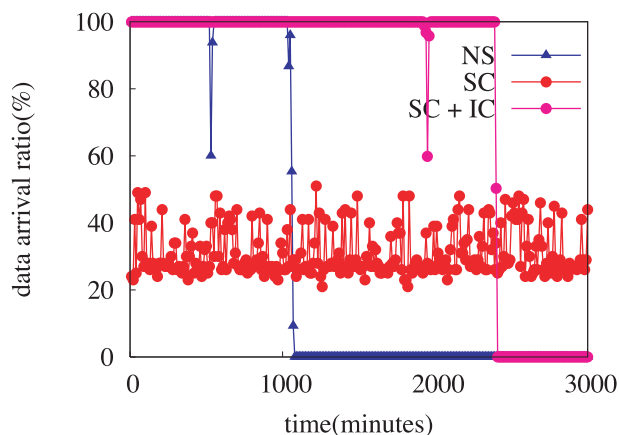


図 12 格子状配置におけるデータ到達率 (シンク A-B)  
Fig. 12 Data arrival rate on grid topology (sink A-B).

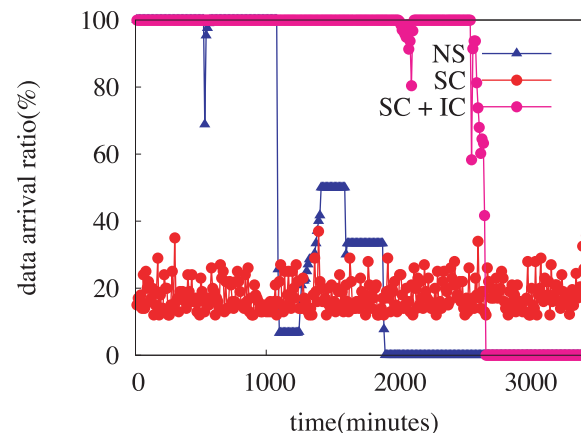


図 13 格子状配置におけるデータ到達率 (シンク A'-B')  
Fig. 13 Data arrival rate on grid topology (sink A'-B').

ネットワーク生存時間も NS 送信方式よりも長期化していることが分かる。

#### 4.4.2 格子状配置におけるデータ到達率

格子状配置におけるデータ到達率の推移を、シンクの位置が A-B の場合については図 12 に、A'-B' の場合については図 13 にそれぞれ示す。十字配置と同様に、ネットワーク生存時間を計測できるようになり、NS 送信方式よりも長期化していることが分かる。

#### 4.4.3 ランダム配置におけるデータ到達率

ランダム配置におけるデータ到達率の推移を、シンクの位置が A-B の場合のみ図 14 に示す。他のトポロジに比べるとネットワーク生存時間が非常に短い。これは、一定間隔で配置されているトポロジとは異なり、シンク付近のセンサノードが少ないためである。しかし、そのような中でも、提案方式のネットワーク生存時間は NS 送信方式に比べて長期化していることが分かる。

#### 4.4.4 ネットワーク生存時間

表 2 に、それぞれの配置におけるネットワーク生存時間をまとめたものを示す。

ここで、ランダム配置については、ノードの配置によってネットワーク生存時間が変化するため、4 回のシミュレーション結果の平均をとっている。

これより、提案方式では全般にネットワーク生存時間が NS 方式に比して、約 3 倍程度に長くなっていることが分かる。また、シンクの数が増えても NS 方式、提案方式とも、生存



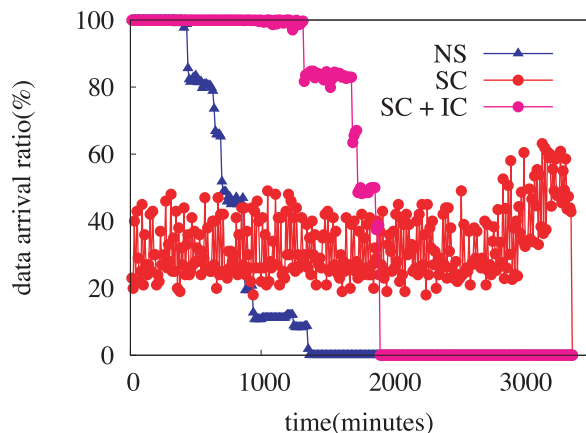


図 14 ランダム配置におけるデータ到達率 (シンク A-B)  
Fig. 14 Data arrival rate on random topology (sink A-B).

表 2 ネットワーク生存時間  
Table 2 Network lifetime.

配置	NS 方式	SC 方式	SC+IC 方式
直線	3350 min	3900 min	—
十字	2390 min	0 min	3450 min
格子状 (AB)	1010 min	0 min	2350 min
格子状 (A'B')	1040 min	0 min	2460 min
ランダム (AB)	452 min	0 min	1417 min
ランダム (ABC)	442 min	0 min	1437 min
ランダム (ABCD)	418 min	0 min	1388 min

時間があまり変動していないが、これはシンクによるフラッディングが増えたことによるトラフィック増大が影響しているものと思われる。

#### 4.4.5 SC モードの効果

表 3 に、ランダム配置の各結果について、提案方式におけるネットワーク生存時間中に SC モードで配送された REP の比率 (SC 率) と、NS 方式に対する提案方式のネットワーク生存時間の比率を示す。

この結果も図 2 と同様、4 回のシミュレーション結果の平均である。

これより、シンクが増えると REP が SC モードで配送される確率が高くなることが分か

表 3 ネットワーク生存時間比  
Table 3 Network lifetime ratio.

配置	SC 率 (%)	比率 ((SC+IC)/NS)
ランダム (AB)	30.8%	3.13
ランダム (ABC)	44.2%	3.25
ランダム (ABCD)	57.9%	3.32

る。しかし現状では、その結果が生存時間の長期化には結び付いていない。SC モードで配送されなかった REP は IC モードで配送されるが、これらはフラッディングが行き詰まったノードからまとめてシンクに送信されるため、SC 率がある程度高くなっても IC モードによる送信数があまり変わらないことがその理由であると思われる。

## 5. 結 論

本論文では、マルチシンクセンサネットワークにおいて、データ収集を要求する REQ メッセージに、各センサノードの観測データを付加して送信することで、データ収集にともなう通信量を抑制し、ネットワーク生存時間を長期化するデータ収集方式を提案した。

また、単純な REQ のフラッディングでは、ネットワークの端で REQ が行き詰まりデータ到達率が低くなってしまいう問題に対し、各センサノードが必要に応じて自らシンクへ向けて REP を送信する IC モードを導入し、データ到達率の向上を図った。

様々なトポロジを想定して行った計算機シミュレーションの結果より、いずれのトポロジにおいても、NS 送信方式に比べてネットワーク生存時間が長期化することが分かった。このことより、提案方式では、センサネットワークにおいて制約のある電力を効率的に利用しているといえる。

本論文で提案した IC モードでは、自身が受信したすべての REP をシンクに向けて送信するが、その中にはすでに他のノードによってシンクに送信されているものや、SC モードでシンクに配送されているものが含まれる。これらの REP の中継によって、ノード配置によってはネットワーク生存時間が短縮される可能性がある。今後はこれらの点を改善する手法を検討する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) Gandham, S.R., Dawande, M., Prakash, R. and Venkatesan, S.: Energy Efficient Schemas for Wireless Sensor Networks with Multiple Mobile Base Station, *Proc.*

- GLOBECOM2003*, pp.377–381 (2003).
- 2) Dubois-Ferriere, H. and Estrin, D.: Efficient and Practical Query Scoping in Sensor Networks, *Proc. IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, pp.564–566 (2004).
  - 3) Oyman, E.I. and Ersoy, C.: Multiple-sink Network Design Problem in Large Scale Wireless Sensor Networks, *Proc. IEEE International Conference on Communications*, Vol.6, pp.3663–3667 (2004).
  - 4) Suzuki, T., Bandai, M. and Watanabe, T.: DispersiveCast: Dispersive Packets Transmission to Multiple sinks for Energy Saving in Sensor Networks, *Proc. IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp.1–5 (2006).
  - 5) 大石忠央, 萬代雅希, 渡辺 尚: ノードの負荷を考慮した複数シンクセンサネットワークのパケット分配送信方式について, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム論文集, Vol.2007, No.1, pp.957–965 (2007).
  - 6) 木利友一, 菅野正嗣, 村田正幸: マルチシンク構成のセンサネットワークにおけるロバストな情報収集メカニズムの提案と評価, 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2006-256), Vol.106, No.578, pp.453–458 (2007).
  - 7) Heinzlma, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *Proc. Hawaii International Conference on Systems Science* (2000).
  - 8) Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proc. ACM/IEEE INFOCOM2002*, pp.1567–1576 (2002).
  - 9) Johnson, D., Maltz, D. and Hu, Y.-C.: The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4, IETF Internet Draft RFC4728 (2007).
  - 10) 小林基成, 森田正範, 高橋直久, 片山善章, 和田幸一: 自己安定クラスタ構造を用いたアドホックネットワークルーティング方式, 情報処理学会研究報告 (2007-MBL-41), Vol.2007, No.44, pp.107–112 (2007).
  - 11) Chen, B., Jamieson, K., Morris, R. and Balakrishnan, H.: Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks, *Proc. ACM/IEEE MOBICOM '01*, pp.85–96 (2001).
  - 12) Xu, X., Heidemann, J. and Estrin, D.: Geography-Informed Energy Conservation for Adhoc Routing, *Proc. ACM/IEEE MOBICOM '01*, pp.70–84 (2001).
  - 13) Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D., Heidemann, J. and Silva, F.: Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.11, No.1, pp.2–16 (2003).
  - 14) Madden, S., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M. and Hong, W.: TAG: A Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks, *Proc. 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002)*, pp.131–146 (2002).
  - 15) 又吉哲次, 高江信次, 田村 瞳, 川原憲治, 尾家祐二: 多重階層型センサネットワークにおける集約センサの選択手法の評価, 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2006-164), Vol.106, No.524, pp.11–16 (2007).
  - 16) Crossbow: MPR2400J/420/520 MIB User's Manual. <http://www.xbow.jp/mpr2400j.pdf>
  - 17) Chipcon: 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver datasheet. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>

(平成 20 年 5 月 19 日受付)

(平成 20 年 11 月 5 日採録)



田中 篤史 (正会員)

2006 年千葉工業大学情報科学部情報ネットワーク学科卒業。2008 年同大学大学院情報科学研究科情報科学専攻博士前期課程修了。同年株式会社クロスキャット入社、現在に至る。



屋代 智之 (正会員)

1992 年慶應義塾大学大学院理工学研究科計測工学専攻修士課程修了。1998 年同大学院後期博士課程修了。同年より千葉工業大学工学部情報ネットワーク学科専任講師。現在、同大学情報科学部情報ネットワーク学科准教授。博士 (工学)。高度道路交通システム (ITS), モバイル・コンピューティング等の研究に従事。情報処理学会高度交通システム研究会幹事。著書『ITS と情報通信技術』(裳華房) 等。電子情報通信学会, 人工知能学会, IEEE 各会員。