

## 環境発電によって電力供給を行う センサネットワークでのデータ収集方式

吉田 将也<sup>†1</sup> 木谷 友哉<sup>†2</sup>  
萬代 雅希<sup>†3</sup> 渡辺 尚<sup>†4</sup>

熱や光、振動などから電力を得る環境発電（エナジーハーベスティング）が次世代センサネットワークの電源として注目されている。エナジーハーベスティングは従来のバッテリーとは異なる不安定な電力供給となるため、データ収集時に中継するノードがつかぬに動作可能とは限らず、パケットの欠落が頻繁に発生する。そこで本研究では、中継時のパケットの欠落に対応し、効率の良いデータ収集を行うため、パリティを用いて冗長にデータを送信する方式（PPT, APT）と通信成功確率に基づいてパケットの再送を行う方式（ERT）を提案する。計算機シミュレーションによる評価の結果、エナジーハーベスティングを用いたセンサネットワークにおいて、提案方式は従来方式と比較してシンクへのデータ到達率を向上させられることが分かった。

### Data Collection Protocols for Energy Harvesting Sensor Networks

MASAYA YOSHIDA,<sup>†1</sup> TOMOYA KITANI,<sup>†2</sup>  
MASAKI BANDAI<sup>†3</sup> and TAKASHI WATANABE<sup>†4</sup>

Energy harvesting technologies have been studied for the next generation wireless sensor networks. The technologies can harvest electric power from ambient energy sources including solar, vibration, heat and wind. However, sensor nodes with such energy harvesting devices cannot always communicate with other nodes because the devices supply power unstably. In this paper, we propose two redundant data collecting protocols with parity checking (PPT and APT) and a retransmitting method based on communication success rate (ERT). The simulation result shows that the proposed protocols achieve higher delivery ratio comparing with conventional protocols.

### 1. はじめに

無線センサネットワークは、多数の小型センサノードを観測エリアに配置し、温度、湿度などの観測データを収集する。センシングしたデータはノード間を無線マルチホップ通信を用いてシンクへ送信される。無線センサネットワークは、環境観測、災害時の情報収集、防犯システムなど多くのアプリケーションで利用されており、広く研究が行われている。従来のセンサネットワークで使用されるセンサノードの多くはバッテリー駆動であり、バッテリーが枯渇したノードはバッテリー交換などのメンテナンスが必要である。大量のセンサノードすべてのメンテナンスが困難な場合や、森林など観測エリアの地理的条件によりメンテナンスを行うこと自体が困難な場合では、バッテリーの枯渇後はそのノードは使用不可能となる。そのため、通信に要する電力を削減してノードの稼働可能時間を延ばし、ネットワークライフタイムを延長することが大きな課題であり、効率的なデータ収集によって省電力を実現する多くのプロトコルが提案されている<sup>1),2)</sup>。

一方で近年では、次世代センサネットワークとして環境発電（エナジーハーベスティング）の利用が注目されている<sup>3),4)</sup>。エナジーハーベスティングは、光や熱、振動などの周囲のエネルギーから発電し、逐次的に電力を供給する技術である。エナジーハーベスティングを利用することで、従来のバッテリーのように電力の枯渇によるメンテナンスの必要がなく、半永久的にセンサネットワークを稼働させることが期待できる。しかし、エナジーハーベスティングはバッテリーとは異なり、充電と電力消費を繰り返す不安定な電力供給となるため、周囲のノードの稼働状態が予測困難である。そのため、従来のバッテリーを想定したプロトコルで用いられているノードどうして同期をとって通信を行う手法は利用できない。エナジーハーベスティングによる電力供給を想定した新しいプロトコルの提案が必要である。

本研究では、電力供給が不安定なエナジーハーベスティングを用いたセンサネットワークにおいて、高いデータ収集効率を達成することを目的とし、効率的なデータ収集プロトコ

†1 静岡大学大学院情報学研究所

Graduate School of Informatics, Shizuoka University

†2 静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点

Division of Global Research Leaders, Shizuoka University

†3 上智大学理工学部情報理工学科

Faculty of Science and Technology, Sophia University

†4 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

ルを提案する．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る評価を行い，提案方式が従来方式と比較して高い性能を達成することを示す．

## 2. 関連研究

センサネットワークでは大量のセンサノードを用いる．そのためセンサノードは，製造コストの削減や設置を容易にするために小型化が求められ，大きさには制限がある．エナジーハーベスティングデバイスによって電源を供給されるノードでは，ノードを持続的に動作させるのに十分な電力を得られるとはいえない．そのため，エナジーハーベスティング技術を用いたセンサノードは，従来のバッテリーを用いたノードとは異なり，図 1 のような充電と電力消費を繰り返す不安定な電力モデルを持つ<sup>5)</sup>．

このような電源供給が不安定なネットワークでは，ある時点において任意のノードが動作可能とは限らない．また，充電にかかる時間は環境によって異なるため，周囲のノードの電力状態の予測が困難である．そのため，従来のセンサネットワークのようにデータ送信時にシンクまでの明確なルートを構築することができない．このように，従来のバッテリーを用いたセンサネットワークとは大きく異なる特徴を持つため，バッテリーの利用を想定したプロトコルの適用が難しい．メディアアクセス制御やルーチングなどについて，トポロジや，スリープ制御による充電と電力消費の調整といった電力管理などを考慮した，エナジーハーベスティングに適した新しいプロトコルの提案が必要である．

エナジーハーベスティングを用いたセンサネットワークの研究として以下のものがなされている．文献 6) では，ノードのキューに蓄積される未送信データ数（平均キュー長）と，

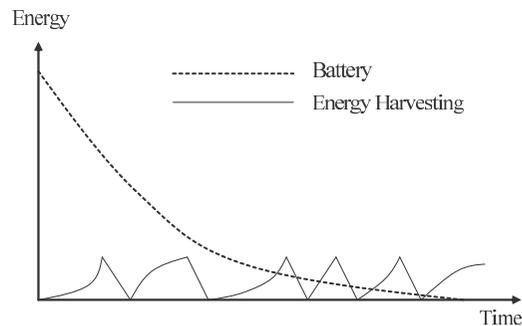


図 1 各電力モデルのエネルギー残量の変化  
Fig. 1 Remaining energy level of each energy model.

スリープ期間中に発生するセンシングできずに失われてしまうデータ量（平均データロスレート）をメトリックに，エナジーハーベスティングセンサノードの準最適なスリープ制御ポリシーを 2 つ提案している．文献 7) では，エナジーハーベスティングノードにおける送信電力制御が，ネットワークのスループットに与える影響について研究している．文献 8) では，ノードのモビリティの考慮が，ネットワークライフタイムに与える影響について研究している．文献 9) では，エナジーハーベスティングを用いたセンサネットワークを構築する際において，単純な 2 つのノード配置に対する簡素なルーチングプロトコルを 3 つ提案し，それぞれの有効性について評価している．

提案手法では，対象を任意のノード配置に拡大し，文献 9) で提案されたプロトコルよりも高いデータ到達率を達成することを目標とする．

## 3. システムモデル

文献 9) で提案されている充電と通信を繰り返すセンサノードの電力モデルを参考に，本研究で対象とするネットワークで使用するエナジーハーベスティングノードを以下のようにモデル化する．

各ノードはそれぞれのエナジーハーベスティングデバイスから電力を供給され，その電力を用いてセンシングおよびデータの送受信を行う．ノードの電力モデルを図 2 に，ノードの動作の状態遷移図を図 3 に示す．

各ノードは図 3 のように充電，受信，送信の 3 つの状態を繰り返す．ノードの動作を図 4 のフローチャートに示す．

ノードは 1 パケットの受信 1 回，1 パケットの送信 1 回が可能な電力量  $E_f$  を充電完了後，他のノードからの送信されるデータの中継するために，一定期間受信待機状態をとる．この

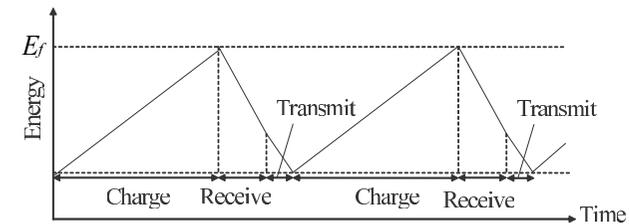


図 2 エナジーハーベスティングの電力モデル  
Fig. 2 Energy model.

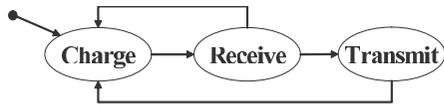


図3 ノードの状態遷移図  
Fig. 3 State transition diagram of each node.

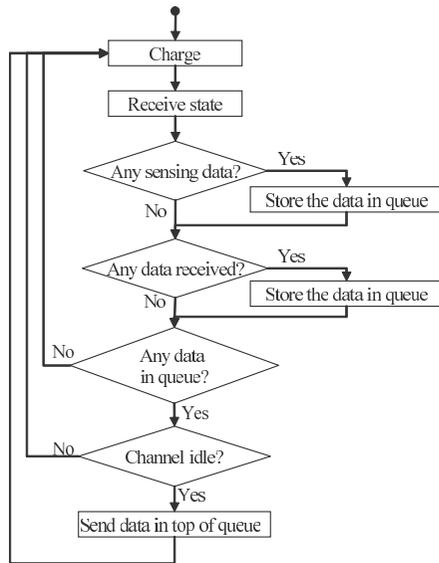


図4 ノードの動作  
Fig. 4 Behavior of nodes.

とき、送信されたパケットを受信するために十分な時間として、受信待機時間  $t_{rx}$  は送信時間  $t_{tx}$  の2倍に設定する。送信時間  $t_{tx}$  は送信レートを  $\alpha$ 、パケットサイズを  $s$  とすると  $s/\alpha$  によって求められる。受信電力、送信電力をそれぞれ  $P_{rx}$ 、 $P_{tx}$  とすると、 $E_f = P_{rx}t_{rx} + P_{tx}t_{tx}$  で表すことができる。受信したデータは各ノードが持つキューに格納される。受信待機状態が終了した時点で、キューにパケットがあり、かつチャンネルがアイドルであればノードは送信状態に移り、キューの先頭にあるパケットをブロードキャスト送信する。このとき周囲のノードが前述した受信状態であれば、このデータを受信し中継を行う。データ送信後、受信

待機とパケット送信を行ったことによって消費した電力を得るために、再び充電を開始する。また、受信待機状態終了時に送信すべきパケットがキューにない場合やチャンネルがアイドルでない場合は送信を行わず、受信待機で消費した電力を充電するために、充電状態に移る。以上の動作を各ノードが繰り返し行うことによって、シンクまでパケットを届ける。

一般的にエナジーハーベスティングを用いたノードでは、充電状態である時間が通信可能な時間に対して非常に長い。たとえば、本モデルにおいて、センサネットワークのノードとしてよく用いられる MICAz のデータシート<sup>10)</sup> から消費電力に関する数値を参照し、文献9) で用いられているデータから充電レートを 10mW、パケットサイズを 800 bit とした場合、同文献中の計算式により、受信時間約 6.4 ms、送信時間約 3.2 ms に対して、充電時間は約 77 ms と求められる。そのため、データ送信時に周囲のノードが充電中であることが多い。このようにエナジーハーベスティングを用いたネットワークでは、電力に関する制約が厳しいため、データを送信したノードはすぐに充電状態に入り、ACK を受け取ることを考えていないモデルが多く提案されている<sup>11)</sup>。

### 3.1 データ収集の動作例と問題点

本モデルを用いたセンサネットワークにおいてデータ収集を行う例を図を用いて示す。まず、図5のようにノードSでデータD1が発生した場合を考える。ノードSの通信範囲内にはノードA、Bの2つのノードがあり、データの中継を行う。各ノードはそれぞれ異なる電力レベルで稼働している。ノードSは発生したデータD1を自身のキューに入れ、充電、受信期間を経て、チャンネルを獲得したらD1をブロードキャスト送信する。このとき、ノードBは充電中のため、受信状態であったノードAのみがD1を受信したとする(図5(a))。受信したノードAは同様にデータD1をブロードキャスト送信し中継する(図5(b))。このときノードAの通信範囲内にあるノードC、Dが受信状態であったとすると、両ノードが同一のデータD1を受信する。そして、先に受信期間を終えたノードCがチャンネルを獲得しD1をブロードキャスト送信する(図5(c))。シンクは安定した電源供給があるものと仮定すると、つねに受信待機しているため、ノードCからデータD1を受信する。以上のように、本モデルではブロードキャスト送信を用いて、受信可能なノードが中継を行うことでシンクまでデータを届ける。

次に、ノードSでデータD2が発生した場合を考える。ノードSはデータD1のときと同様にしてD2をブロードキャスト送信する(図6)。しかしこのとき、ノードA、Bの両ノードが充電中であった場合、データD2を受信することができない。また、本モデルでは1wayの通信を想定しているため、送信したノードSは周囲のノードがデータD2を受信で

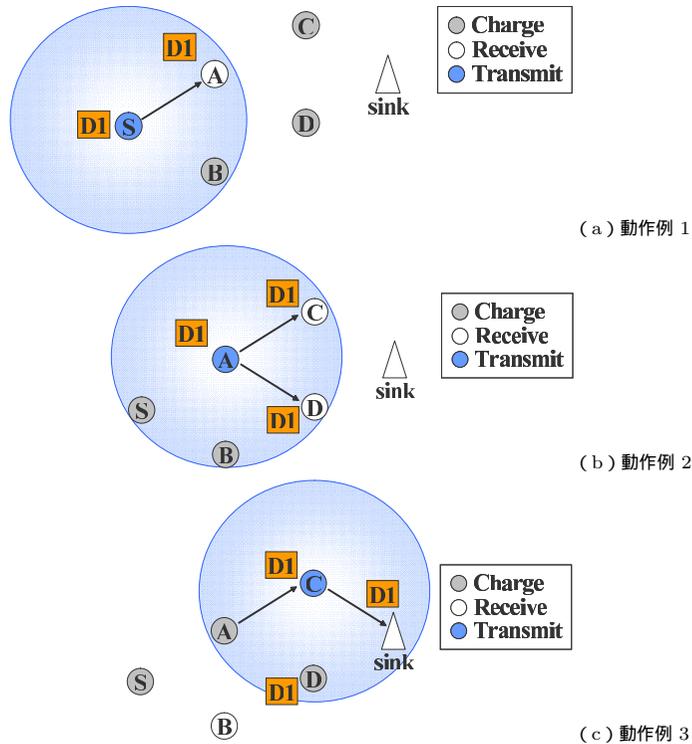


図 5 データ収集の動作例  
Fig. 5 Examples of data collection.

きなかったことを知ることができない。データ D2 は中継されることなく失われてしまい、データ到達率の低下につながる。

このように、本モデルではデータ送信を行う際に近隣のノードがつねにそのデータを受信可能であるとは限らない。つまり各中継ノード間で中継データの欠落が頻繁に発生する。従来のスリープ制御を行うセンサネットワークでも同様の問題が起こるが、スリープ時刻の同期などによって問題を解決することが考えられている<sup>2),12)</sup>。しかし、エネルギーハーベスティングを用いたセンサネットワークでは、各ノードの充電期間が不定長であるため、このような手法は利用できない。

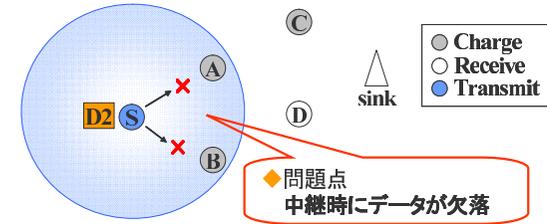


図 6 データ収集の問題点  
Fig. 6 Problem of data collection.

#### 4. 提案方式

3 章では、動作例を用いてエネルギーハーベスティングで電力供給されるセンサネットワークでは中継時にデータの欠落が発生することを示した。そのようなデータの欠落が発生するような環境において、データ到達率を向上させるための方策として、冗長にデータを送信することが考えられる。冗長性を持たせる方法として、主に次の 2 つの方法が考えられる：冗長性を持つデータを混在させて送信する方法、送信回数を増やして冗長性を持たせる方法。本論文では、前者の方法として、送信する複数のデータパケットからパリティパケットを作成して送信し、各中継ノードにおいてデータの欠落があった場合にパリティを用いてデータを逐次復元していく「冗長データ収集方式」を提案する。また後者の方法として、周囲のノード数と充電周期から推測した受信確率から、それら周囲のノードが受信するデータ数の期待値を計算し、それが一定値以上になるように再送回数を決めて同じデータを繰り返し送信する「確率的データ収集方式」を提案する。

提案する 2 種類の手法は互いに独立な手法であり、それぞれの手法の有効性が明確に分かるようにするため、本論文ではそれぞれを分けて評価する。独立な手法どうしであるため、組み合わせることによりさらにデータ到達率を向上させることが可能であると考えられるが、それは今後の課題とする。

本章では、これら 2 種類の手法について説明する。

##### 4.1 冗長データ収集方式

中継時のデータ欠落に対応するため、冗長データ収集方式では、複数のデータからパリティを作成、送信して冗長なデータ収集を行う。また、パリティを定期的に送信する Periodic Parity Transmission (PPT) と、キューの状況に応じてパリティを送信する Adaptive



図 7 XOR 演算を用いたパリティの作成とデータの復元

Fig. 7 Generation of parity packet with XOR operation and data recovery.

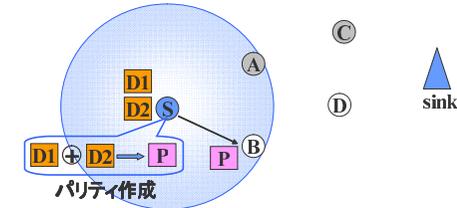


図 8 パリティの作成

Fig. 8 Generation of parity packet.

Parity Transmission (APT) の 2 つの方式を考える．提案方式の詳細な説明に移る前に，XOR 演算を用いたパリティについて説明する．

#### 4.1.1 パリティを用いたデータの冗長化

データの XOR 演算の例として，同一サイズの 2 つのデータ  $D1, D2$  について考える (図 7).  $D1$  と  $D2$  を XOR 演算したデータ ( $D1 \oplus D2$ ) もまた  $D1, D2$  と同サイズである．この ( $D1 \oplus D2$ ) に対して再び  $D1$  を XOR 演算することで， $D2$  を復元できる (同様に ( $D1 \oplus D2$ ) と  $D2$  を XOR 演算することで  $D1$  を復元できる)<sup>3)</sup>．一般に， $N$  個のデータの XOR 演算によって作成されたパリティデータを用いることで，その  $(N + 1)$  個のデータ送信のうち，任意の 1 つのデータが欠落しても，元の  $N$  個のデータを復元することが可能である．

#### 4.1.2 提案する冗長データ収集方式の概要

提案する冗長データ収集方式では，データ欠落に対応するため，複数のデータパケットを XOR 演算したパリティパケットを作成し，送信してデータ収集を行う．

図 6 に示されたデータパケット  $D2$  送信後，ノード  $S$  は  $D1$  と  $D2$  を XOR 演算することで，パリティの役割をするパケット  $P$  を作成する (図 8)．そして， $D1, D2$  と同様にパリティパケット  $P$  をブロードキャスト送信し，中継を行う． $D1, D2, P$  を中継し，図 9 のように各ノードがデータを受信したとする．このとき，ノード  $D$  では  $D2$  が欠落しているが，受信した  $D1$  と  $P$  を再び XOR 演算することで，失われた  $D2$  を復元することができる．ノード  $D$  は復元した  $D2$  を送信することでシンクへと届ける．このように，提案方式ではパリティを用いて冗長にデータを収集することで，中継時に欠落したデータを各中継ノードおよびシンクで復元することができ，データ収集率の向上が期待できる．

以下では，ネットワーク環境に応じてより効率的なデータ収集を可能にするため，パリティを作成，送信する手順が異なる，Periodic Parity Transmission (PPT) と Adaptive Parity Transmission (APT) の 2 種類の方式を提案する．

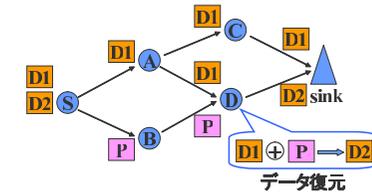


図 9 パリティからデータパケットを復元

Fig. 9 Data recovery using parity packet.

#### 4.1.3 Periodic Parity Transmission (PPT)

PPT では， $x$  回の送信に 1 回パリティパケットを送信するという値  $x$  ( $3$  以上の整数) をあらかじめ設定しておくことで，定期的にパリティパケットの送信を行う．ノードは  $x - 1$  回データパケットの送信を行った後，その  $x - 1$  個のデータパケットを XOR 演算することでパリティパケットを作成し，送信する．パリティパケットを受信したノードは，パリティパケットを構成する  $x - 1$  個のデータパケットのうち， $x - 2$  個を所持していれば，欠落したデータパケットの復元が可能である．復元したデータパケットはキューに追加し，改めて送信を行う．また受信したパリティパケットも同様に送信する．これは，パリティパケットを中継することで，他ノードにおいても欠落したデータパケットを復元する機会を得るためである． $x$  を変化させることで，冗長度  $\frac{1}{x}$  を制御することができる．PPT での各ノードの動作を図 10 に示す．この方式では，定期的にパリティパケットを送信することで，失われたデータパケットを復元する機会を安定して得られるという長所を持つ．しかし，ネットワークの状況にかかわらずパリティパケットを送信してしまうため，データ発生頻度が高いネットワークでは，冗長なパケットであるパリティパケットを送信することでネットワーク内のパケット量が増加し，通信の衝突確率が高まるという欠点を持つ．

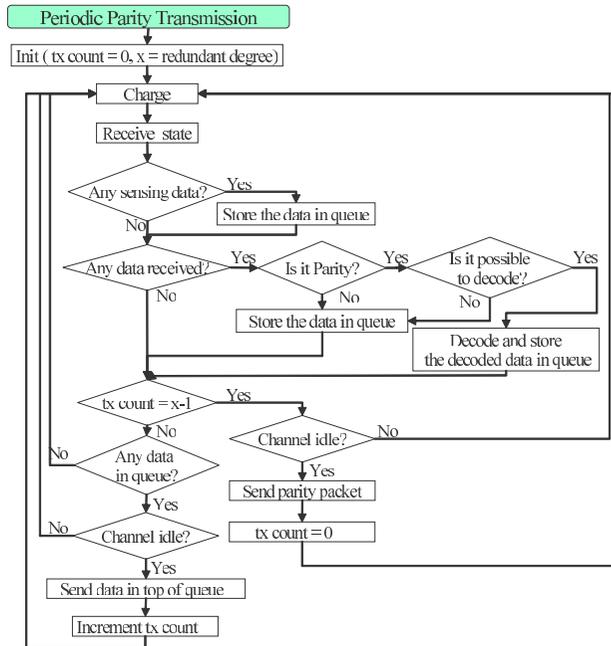


図 10 PPT での各ノードの動作  
Fig. 10 Behavior of nodes in PPT manner.

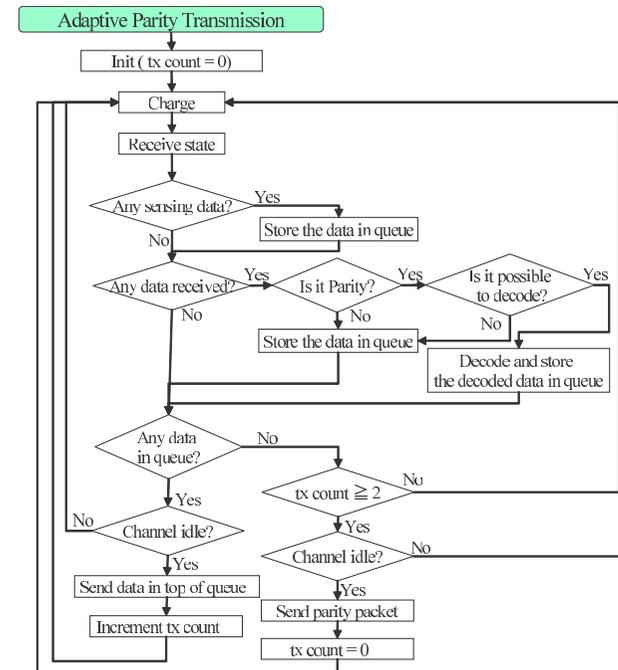


図 11 APT での各ノードの動作  
Fig. 11 Behavior of nodes in APT manner.

#### 4.1.4 Adaptive Parity Transmission (APT)

APT は PPT の動作をベースに、各ノードのキューに送信すべきデータパケットがないときには、送信回数が  $x - 1$  回に満たなくても、ただちにパリティパケットを作成、送信する。そのため、パリティパケットがいくつのデータパケットから作成されるか一定ではない。データの発生頻度が十分に低いネットワークでは、 $x = 3$  の PPT とほぼ同様の動作になる。APT での各ノードの動作を図 11 に示す。この方式では、PPT に比べて、トラヒック状況にあわせて柔軟にパリティを送信でき、限られた送信機会を最大限活かすことができる。また、 $x$  に適切な値を選ぶことで、過剰なパリティの増加を防ぐことができる。

#### 4.2 確率的データ収集方式

3 章で示した動作モデルでは、送信ノードは送信したパケットを周囲のノードが受信できたかどうか知ることができない。送信済みのパケットは、受信ノードの有無にかかわらず破

棄するものとなっており、その結果データ到達率の低下につながることを動作例を用いて示した。同一のデータを繰り返し送信することで、周囲のノードが送信されたパケットを受信する確率を高めることが可能だが、不必要な再送は消費電力の増加と充電時間の延長を招く。

そこで、適切な再送を行うことで効率的なデータ収集を可能とするため、各ノードが送信されたデータを受信できる確率をノードの稼働時間から求め、受信可能ノード数の期待値に基づいてデータの再送を行う Expectation based Retransmission (ERT) を提案する。

#### 4.2.1 ノードの受信成功確率の計測

各ノードは自身の稼働時間を計測するためにタイマを所持し、ノード  $n_i$  はある時点での自身の総充電時間  $T_{chi}$ 、総受信時間  $T_{rxi}$ 、総送信時間  $T_{txi}$  および総経過時間  $T_{totali} = T_{chi} + T_{rxi} + T_{txi}$  を計測し保持可能なものとする。ここで、あるノード  $n_j$  がパケット送

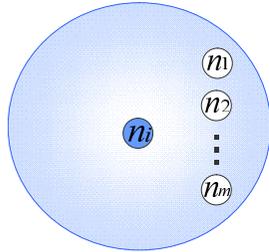


図 12 ノード  $n_i$  のブロードキャスト  
Fig. 12 Broadcast a packet at node  $n_i$ .

信を行う際に、ノード  $n_j$  の通信範囲内にあるノード  $n_k$  が送信されたパケットを受信できる確率  $p_k$  は、 $T_{totalk}$  が十分に大きいとき、送信時間  $t_{tx}$ 、受信待機時間  $t_{rx}$  を用いて次式で近似される。

$$p_k \approx \frac{T_{rxk}}{T_{totalk}} \cdot \frac{t_{rx} - t_{tx}}{t_{rx}}$$

この値をもとに ERT ではパケット再送の制御を行う。

#### 4.2.2 Expectation based ReTransmission (ERT)

適切な再送を行うことでデータの欠落を補うため、ERT では、送信ノードはパケットを送信した際に、そのデータを受信できるノード数の期待値を計算し、最適な再送回数を求める。図 12 に示すように送信ノード  $n_i$  の通信範囲内に  $m$  個のノードがある場合を考える。

ノード  $n_i$  がパケットを 1 回送信したとき、ノード  $n_i$  の通信範囲内のノード  $n_1, n_2, \dots, n_m$  はそれぞれ確率  $p_1, p_2, \dots, p_m$  でこのパケットを受信する。各ノードが受信するパケット数 (0 または 1) を確率変数  $X_1, X_2, \dots, X_m$  で表すとき、1 回の送信で受信されるパケット数の期待値  $E_i = E[X_1 + X_2 + \dots + X_m]$  は期待値の加法性より以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} E_i &= E[X_1 + X_2 + \dots + X_m] = E[X_1] + E[X_2] + \dots + E[X_m] \\ &= \{0 \cdot (1 - p_1) + 1 \cdot p_1\} + \{0 \cdot (1 - p_2) + 1 \cdot p_2\} + \dots + \{0 \cdot (1 - p_m) + 1 \cdot p_m\} \end{aligned}$$

また、送信ノードが  $a$  (1 以上の整数) 回の送信を行ったとき受信されるパケット数の期待値は次式で表される。

$$a \cdot E[X_1 + X_2 + \dots + X_m]$$

同一ノードが複数回受信する場合があるため、パケットを受信するノード数の期待値とは必ずしも一致しない。ここで、 $a \cdot E_i > \mu$  を満たす最小の  $a$  は確率的に  $\mu$  個以上のノードがパケットを受信する送信回数を表す。送信ノードは周囲のノードの受信成功確率から最

小の  $a$  を計算し、平均  $\mu$  個のノードがパケットを受信するよう同一パケットを  $a$  回送信することで、中継時のパケット損失に対応する。この期待値の閾値  $\mu$  を大きく設定することで、高い確率でデータを受信できるようになるが、 $\mu$  が大きいほど送信回数  $a$  が増加する。充電レートが低い場合や、通信範囲内にあるノード数が少ない場合、 $E_i$  が小さな値となり、最小の  $a$  が大きな値になってしまう。その結果、データ発生頻度が高いネットワークではキューに未送信データが蓄積してしまうことが考えられる。

#### 4.2.3 ノードの受信成功確率の交換方法

提案する確率的データ収集方式では、送信ノードは、周囲のノードの受信成功確率を用いて送信回数の計算を行う。この確率は各ノードが自身で計算するため、各ノードは何らかの方法で周囲のノードの情報を得る必要がある。

ノード間で情報交換を行う方法としてまず考えられるのは、情報交換を行う期間を設けることである。データパケットの送信を行わずに確率情報の交換のみを行う期間を定期的に設けることで、すべてのノードが周囲のノードの情報を更新する。しかしながら、エナジーハーベスティングを用いたセンサネットワークでは、この期間に必要な電力量が必ずしも充電されているとは限らないため、実現することは難しい。

別の手法として考えられるのは、送信するデータパケットにノードの送信確率情報を付与することである。こうすることで、特別な期間を設けることなく、動作モデルを変化させずに確率情報の交換が可能となる。本モデルでは、パケット送信の際にブロードキャストを行う。よって複数のノードが同時に受信することが可能である。受信したノードはパケットに付与された情報で古い情報を更新する。しかし、送信されたデータパケットは必ずしも周囲のノードが受信できるとは限らない。そのため、データパケット送信時に毎回確率情報を付与する必要があり、結果として送信に必要な電力量が大きくなることが考えられる。また、充電レートが低いなどの理由でデータパケットを受信できる頻度が低いノードは情報交換の頻度も低下し、古い情報が長期間更新されない可能性がある。

## 5. 評価

本研究で対象とするモデルを実装した計算機シミュレータを用いて評価を行う。各ノードは 3 章で示されたモデルに従ってデータをシンクまでマルチホップ通信で伝達する。シンクのみ安定した電源供給があるものとし、つねに受信待機しているものとする。シミュレーションにおいて、通信範囲内のパケットロスは無いものとし、また、一部でも衝突したパケットは正しく受信されないものとする。送受信電力や送信レートなど、ノードの各種パラ

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

シミュレーション時間	1,000 (s)
通信距離	20 (m)
送信電力	76.2 (mW)
受信電力	83.1 (mW)
データサイズ	800 (bits)
送信レート	250 (kbps)
平均充電レート	10 (mW)

表 2 比較プロトコル  
Table 2 Protocols for evaluations.

プロトコル	パリティ	再送	概要
GR	×	×	位置情報によるデータの破棄
GR-DD-RT	×		チャネルが空いている限り繰り返し再送
PPT		×	定期的にパリティを送信
ERT	×		受信確率から計算した回数だけ再送

メータは MICAz<sup>10)</sup> を参考に設定する．主なシミュレーションパラメータを表 1 に示す．ここで、充電レートを除くパラメータは固定値とする．充電レートは平均 10 (mW) とし、分散 2 (mW<sup>2</sup>) の一様分布に従う乱数で与える．

評価指標としてデータ到達率を用いる．データ到達率は(シンクに到達したユニークなデータパケット数)を(全発生データパケット数)で割ったものとする．提案方式 PPT, ERT の性能を評価するため、文献 9) で提案されている Geographic Routing (GR), Geographic Routing with Duplicate Detection and Retransmission (GR-DD-RT) を比較対象に用いる．ここでは APT の評価は行わない．

GR はあるノードがデータを受信した際、自身が送信ノードよりもシンクからの物理的距離が遠い場合に、受信したデータをキューに入れずに破棄する方式である．

GR-DD-RT では、GR の動作に加え、データの破棄と再送を行う．以前に受信したことのあるデータを再び受信した場合にそのデータを破棄する．また、ノードの充電が完了し、送信機会を得たときに、キューに送信すべき未送信データがない場合、前回の送信時に送信したデータを再び送信する．比較プロトコルとその概要を表 2 に示す．

提案方式でも GR-DD-RT のデータ破棄手法を取り入れ、位置情報によるデータの破棄と、同一データを受信した場合は破棄を行う．想定するデータサイズ 800 bit に対して、確

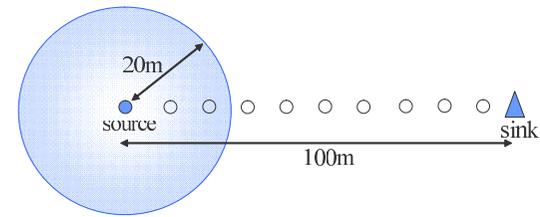


図 13 直線トポロジ  
Fig. 13 Straight topology.

率情報は 16 bit 程度で十分である．そのため確率情報の交換によるオーバーヘッドは小さいものとし、本評価では無視するものとする．同様に PPT においてパリティの演算に必要な電力などは考慮しない．

以下では、基本的な評価として直線トポロジによる評価と、実際の環境に近いランダムなトポロジでの評価を示す．冗長データ収集方式と、確率的データ収集方式の性能を独立して評価し、それぞれ従来方式と比較を行う．

### 5.1 直線トポロジ

図 13 に示すように  $n$  個のノードを等間隔で直線上に配置し、両端のノードをそれぞれソースノード、シンクノードとする．ソースノードでは、到着率 1 (packets/s) のポアソン分布に従ってデータが発生する．直線トポロジにおけるシミュレーションでは、ソース・シンク間距離を 100m 固定とする．そのため、ノード数  $n$  が増加するとネットワークのノード密度が高くなることになる．

#### 5.1.1 直線トポロジにおける PPT の評価

提案する PPT の性能を評価するため、ノード数  $n$  を変化させることで、ネットワークのノード密度を変化させ、データ到達率の変化を見る．ノード数を変化させたときのデータ到達率のシミュレーション結果を図 14 に示す．

図 14 から提案方式である PPT は、従来方式と比較して高いデータ到達率を達成していることが分かる．提案方式ではパリティを用いて中継時に欠落した多くのパケットを復元している．パリティ送信間隔の最も短い  $x = 3$  がより高い性能を示しているが、ノード数が増加するにつれ、 $x = 4$  との差が小さくなっている．パリティによるデータの復元は、 $x$  パケットの送信あたりたかだか 1 個のデータ欠落でないと実現できない．ノード密度が低く、元々のデータ到達率が低い場合においては、データ欠落の頻度が高く、 $x$  が大きいほどデータ復元が困難になる．対して、ノード密度が高くなり、元々のデータ到達率が高いときは、

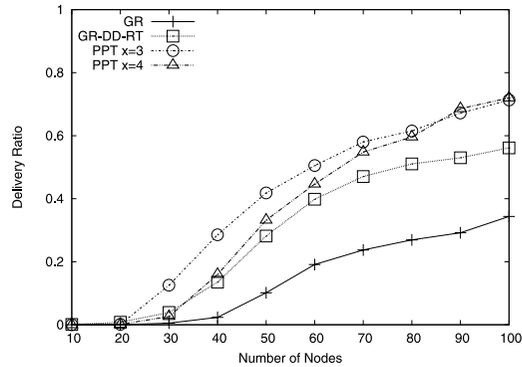


図 14 ノード密度に対するデータ到達率 (PPT と従来方式) (直線トポロジ)

Fig. 14 Node density vs. data delivery ratio (PPT and conventional methods) (Nodes on a line).

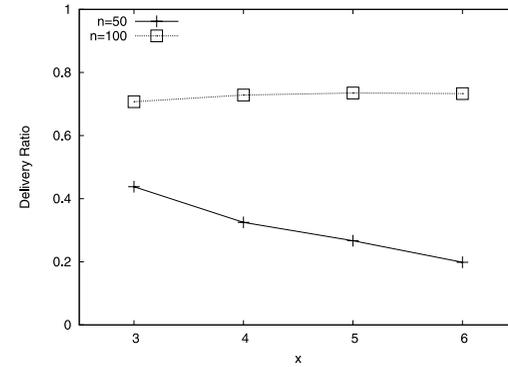


図 15 パリティ送信間隔  $x$  に対するデータ到達率

Fig. 15 Parity packet generation interval vs. data delivery ratio.

$x$  が小さいほどパリティを送るオーバーヘッドが大きくなる。

また、すべての方式でノード密度が高くなるにつれデータ到達率が向上する。これは、ノード密度が高いほどノードの通信範囲内にあるノード数が増えるため、パケットをブロードキャスト送信した際に受信可能なノード数が増えるためである。GR-DD-RT はデータの破棄と再送を行うことで GR より高いデータ到達率を達成しているが、ノード数が増加するにつれて PPT に差をつけられる結果になっている。これはノード密度が高くなることで、ノードがチャネルを獲得しにくくなり再送の機会が得られにくくなることや、再送によるパケットの増加で衝突が起きていることが原因だと考えられる。

図 14 の結果から、パリティ送信間隔  $x$  がデータ到達率に影響を与えることが分かった。そこで、 $x$  を 3, 4, 5, 6 と変化させデータ到達率に与える影響を見る。ノード密度の異なるノード数 50 とノード数 100 の 2 種類をシミュレーションする。パリティ送信間隔  $x$  に対するデータ到達率のシミュレーション結果を図 15 に示す。

図 15 から分かるようにノード数 50 の場合では、パリティ送信間隔が短いほど高いデータ到達率を達成している。より多くのパリティを送信する方式ほど、多くの欠落したデータを復元し、高いデータ到達率を達成していると考えられる。一方で、ノード数 100 の場合では、 $x$  の変化によるデータ到達率の影響は小さく、ほぼ同等のデータ到達率となっている。これは、ノード数 50 と比較してネットワーク内のノード密度が高くなるため元々のデータ到達率が高くなり、 $x$  が大きい場合においてもデータの復元ができているためだと考えられる。以上の結果から、ネットワークの状況によって、最適なパリティ送信間隔  $x$  が存在する

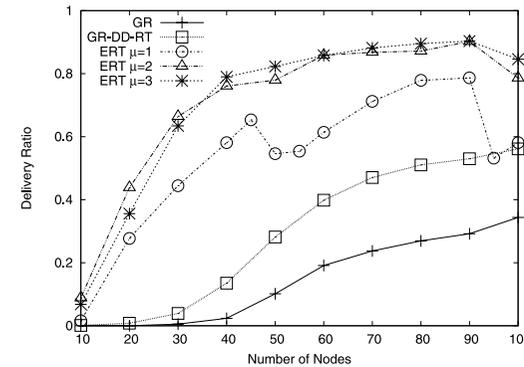


図 16 ノード密度に対するデータ到達率 (ERT と従来方式) (直線トポロジ)

Fig. 16 Node density vs. data delivery ratio (ERT and conventional methods) (Nodes on a line).

ことが分かる。また、 $x$  は 3 が最小値であり、 $x$  を 3 に設定しても中継ノードやシンクノードでデータの復元ができないほど元々のデータ到達率が低い場合では、提案する PPT の効果は低くなる。

### 5.1.2 直線トポロジにおける ERT の評価

PPT の評価と同様、ERT の性能の評価を行う。ノード数を変化させたときのデータ到達率の変化を図 16 に示す。

図 16 から、ERT も従来方式と比較して高いデータ到達率を達成することが分かる。特

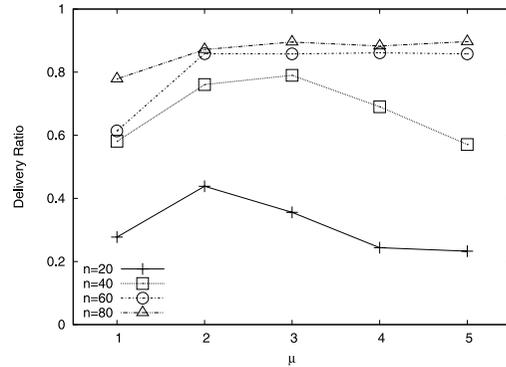
図 17 期待値の閾値  $\mu$  に対するデータ到達率

Fig. 17 Threshold of number of expected received packets at neighbor nodes vs. data delivery ratio.

に ERT は PPT と比較しても高い性能を示している．同一パケットを複数回送信することでパケットの欠落を補うのに加え，適切な再送回数を計算により求めることで GR-DD-RT よりも消費電力を抑え，送受信の機会を増加させている．

ERT での送信回数を計算する際に用いる期待値の閾値  $\mu$  もデータ到達率に影響を与えており， $\mu = 3$  に設定した場合に高い到達率を達成している．また， $\mu = 1$  では， $\mu = 2, 3$  の場合と比較して送信回数が少なく計算されるため，比較すると低い性能となっている． $\mu = 1$  の場合，ノード数 50, 100 付近でデータ到達率の低下が見られる．ノード数が増加するにつれ，送信ノードの通信範囲内にあるノード数が増加し，1 回の送信で受信されるパケット数の期待値  $E_i$  が大きくなる．結果，再送回数  $a$  が小さくなる．ここで  $a$  は整数値であり，ノード数 50 やノード数 100 付近は  $a$  の値が 1 減少する境界であると考えられる． $\mu$  を小さく設定してある場合は元々の  $a$  も小さいため， $a$  が 1 減少することで再総回数が大きく変化し図 16 中のノード数 50 や 100 付近で性能が低下している．また，特にノード数 95, 100 の場合では， $a$  が 1 となるノードが現れ，再送が行われず，中継時のパケットロスに対応できないため，大きく性能が低下してしまっている．

図 16 の結果より，ERT では期待値の閾値  $\mu$  を変化させることによって，ERT で計算される送信回数が増加し，達成するデータ到達率に影響を与えることが分かった．そこで， $\mu$  を 1, 2, 3, 4, 5 と変化させ，データ到達率に影響を見る．ノード数 20, 40, 60, 80 を評価し，ネットワークの環境と  $\mu$  の関係性を評価する．ERT における期待値の閾値  $\mu$  に対するデータ到達率のシミュレーション結果を図 17 に示す．

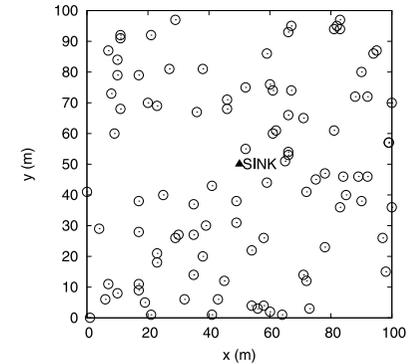


図 18 ノード数 100 のランダムトポロジーの例

Fig. 18 Example of random topology with 100 nodes.

図 17 は，ノード数 20 の場合では， $\mu = 2$  のとき最大のデータ到達率を達成するのに対し，ノード数 40 の場合では， $\mu = 3$  のときが最も高い性能を達成することを示している．ノード密度が低い環境で， $\mu$  を高く設定した場合，設定した期待値の閾値を超えるために，再送回数が増加し，結果としてノードの充電時間の増加，受信機会の減少を招いているため，このような結果になると考えられる．以上のことから，ノード数によって適切な  $\mu$  が存在することが分かる．ERT ではネットワークの環境に応じて適切な閾値  $\mu$  を設定することで，より高いデータ到達率を達成できる．一方でノード数 60, 80 では， $\mu$  が 2 以上の場合， $\mu$  の変化がデータ到達率に与える影響は小さい．また，一般的なセンサネットワークにおけるノード密度で評価実験を行っていることから， $\mu$  は 2 から 3 に設定することで，安定して高いデータ到達率を達成できる．ただし，データ到達率はノード密度のほかに，トポロジーや充電レートに影響される．

## 5.2 ランダムトポロジー

実際のセンサネットワークでは，ノードの配置が不規則であったり，データの伝達が独立した複数のパスによって行われたりすることがある．そこで，通信範囲内のノード数のばらつきや複数のパスによるデータ伝達の影響を評価するため，ランダムトポロジーでの評価を行う．100 m × 100 m の正方形のエリアにランダムに  $n$  個のノードを配置する．シンクのみ固定でエリアの中央に配置する．ランダムに配置されたノードから 1 つを選択し，到着率 1 (packets/s) のポアソン分布に従って 10 秒間データを発生させる．全ノードについてデータ到達率を評価し，平均値を求める．図 18 にノード数 100 のトポロジーの例を示す．

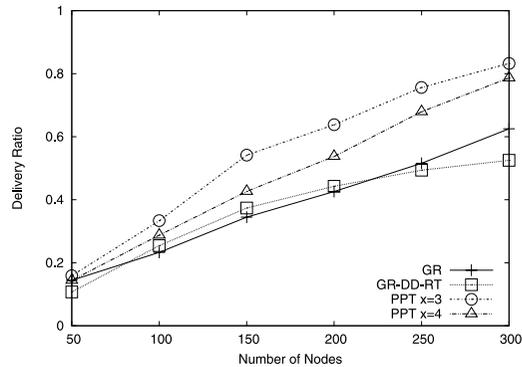


図 19 ノード数に対するデータ到達率 (PPT と従来方式)

Fig. 19 Number of nodes vs. data delivery ratio (PPT and conventional methods).

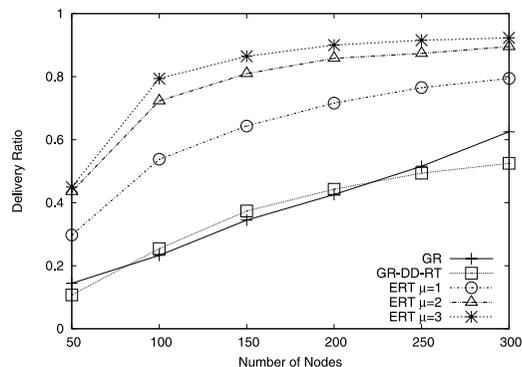


図 20 ノード数に対するデータ到達率 (ERT と従来方式)

Fig. 20 Number of nodes vs. data delivery ratio (ERT and conventional methods).

ノード数を変化させることで、ノード密度を変化させたときのデータ到達率の変化を見る。シミュレーション結果を図 19、図 20 に示す。

図 19 から分かるように、ランダムトポロジでの評価においても、提案する PPT は、中継ノードやシンクでのパリティによる欠落パケット復元の効果によって、従来方式 GR、GR-DD-RT よりも高いデータ到達率を達成している。また、直線トポロジでの評価と同様、ネットワークのノード密度が増加するにつれて、通信範囲内のノード数が増加し、送信されたパケットを受信する確率が高くなるため、すべての方式でデータ到達率が向上している。特に

パリティによる欠落パケット復元の機会が多く得られる  $x = 3$  が最も高い性能を示した。

図 20 から、ERT はランダムトポロジにおいても高い到達率を達成することが分かる。ランダムトポロジでは、直線トポロジとは異なり、ノードによって通信範囲内に存在する周辺ノード数が大きく異なる。周囲にノードが多いノードが送信した場合は、1 回の送信で多くのノードが受信できる可能性があるが、近隣ノード数の少ないノードが送信した場合には、中継ノードが受信できる確率は低くなる。ERT では、通信範囲内のノード数も考慮し、ノードごとに適切な送信回数を計算するため、近隣ノードが少ないノードは送信回数を増加させることで、安定して高い確率でパケットを中継することができる。このような環境に応じた送信回数の決定により、従来手法と比較して、ERT は高い性能を達成すると考えられる。直線トポロジと同様、適切な  $\mu$  の設定が必要である。

## 6. おわりに

本論文では、エネルギーハーベスティングを用いたセンサネットワークにおいて効率的なデータ収集を行う手法として、冗長データ収集方式と確率的データ収集方式を提案した。冗長データ収集方式では、センシングして得た複数のデータからパリティパケットを作成、送信することで、中継時に欠落したデータを復元する。パリティの送信方法によって、PPT と APT の 2 種類を提案した。確率的データ収集方式では、送信されるパケットを受信できる確率をノードの稼働時間から求め、制御に利用する。受信成功確率をもとに適切な再送回数を求めて同一データの送信を繰り返す ERT を提案した。計算機シミュレーションによって、直線トポロジとランダムトポロジでの評価を行い、提案方式は従来方式と比較して高いデータ収集効率を達成することを示した。また、適切なパリティ送信頻度が存在することや、適切な閾値の設定が必要であることが分かった。

今後は、PPT において適切なパリティ送信頻度  $x$  を選択する方法を検討する。ERT において、トポロジや充電レートがデータ到達率に与える影響を評価し、適切な閾値  $\mu$  を選択する方法を検討する。また、冗長データ収集方式と確率的データ収集方式を組み合わせた方式を検討し、性能向上を図る。パリティの演算にかかる消費電力や確率情報の交換などのオーバーヘッドを含めた詳細な評価を行う。

謝辞 本研究は科研費基盤研究 A (20240005) および、若手研究 B (21700071) の助成を受けて行った。

## 参考文献

- 1) Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *The Hawaii Int'l Conf. on System Sciences*, pp.1–10 (2000).
- 2) Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *The 21st Annual Joint Conf. IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, pp.1567–1576 (2002).
- 3) Ansal, A. and Srivastava, M.: An environmental energy harvesting framework for sensor networks, *The 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp.481–486 (2003).
- 4) Park, C. and Chou, P.: AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes, *SECON*, pp.168–177 (2006).
- 5) Seah, W., Eu, Z. and Tan, H.-P.: Wireless Sensor Networks Powered by Ambient energy Harvesting (WSN-HEAP) Survey and Challenges, *1st Int'l Conf. on Wireless VITAE*, pp.1–5 (2009).
- 6) Joseph, V., Sharma, V. and Mukherji, U.: Optimal Sleep-Wake Policies for an Energy Harvesting Sensor Node, *PEDIATRICS*, Vol.115, No.1, pp.250–256 (2005).
- 7) Tan, H.-P., Lee, P., Seah, W. and Eu, Z.: Impact of Power Control in Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) for Railroad Health Monitoring, *2009 Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pp.804–809 (2009).
- 8) Rahimi, M., Shah, H., Sukhatme, G. and Heideman, J.: Studying the Feasibility of Energy Harvesting in a Mobile Sensor Network, *IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, pp.19–24 (2003).
- 9) Eu, Z., Tan, H. and Seah, W.: Routing and relay node placement in wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting, *The IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.5–8 (2009).
- 10) Memsic Corp.: MICAz Datasheet. <http://www.memsic.com/products/wireless-sensor-networks/wireless-modules.html>
- 11) 森戸 貴, 猿渡俊介, 南 正輝, 森川博之: バッテリレス無線センサネットワークにおけるデータ収集プロトコルの設計と評価, *信学技報*, Vol.108, No.458 (IN2008-157), pp.151–156 (2009).
- 12) Dam, T. and Langendoen, K.: An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *The 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03)* (2003).
- 13) Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., M'edard, M. and Crowcroft, J.: XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding, *The 2006 Conference on Applications,*

*Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications*, pp.11–15 (2006).

(平成 22 年 5 月 21 日受付)

(平成 22 年 12 月 1 日採録)



吉田 将也 (正会員)

2010 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。現在、同大学大学院修士課程在学中。エナジーハーベスティング、センサネットワークに関する研究に従事。



木谷 友哉 (正会員)

2002 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。2004 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2006 年同大学院博士後期課程修了。博士(情報科学)。2005 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2007 年同助教。2008 年静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点特任助教, 現在に至る。2010 年オハイオ州立大学客員研究員。主として, 組合せ最適化, 組み込みシステム, 通信ネットワーク, 車車間通信の研究に従事。IEEE 会員。



萬代 雅希 (正会員)

1996 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1998 年同大学大学院修士課程修了。2004 年同大学院博士課程修了。1998~2000 年ソニー(株)勤務。2001~2003 年日本学術振興会特別研究員。2004 年静岡大学情報学部情報科学科助手。2007 年同助教。2010 年上智大学理工学部情報理工学科准教授。現在に至る。2006~2007 年ブリティッシュコロンビア大学訪問研究員。主として, 通信ネットワークに関する研究に従事。博士(工学)。2007 年情報処理学会山下記念研究賞受賞。IEEE 会員。



渡辺 尚 (正会員)

1982年大阪大学工学部通信工学科卒業．1984年同大学大学院博士前期課程修了．1987年同大学院博士後期課程修了．工学博士．同年徳島大学工学部情報工学科助手．1990年静岡大学工学部情報知識工学科助教授．1996年静岡大学情報学部情報科学科教授．現在，静岡大学創造科学技術大学院教授．静岡大学情報学部情報科学科教授兼任．1995年文部省在外研究員（カリフォルニア大学アーバイン校）．計算機ネットワーク，分散システムに関する研究に従事．2005年より2009年まで情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査．訳書『計算機設計技法』，『802.11無線ネットワーク管理』等．IEEE会員．

---