

エネルギーハーベストによって駆動する 無線センサネットワークのためのレートレス符号化

稲葉 友紀¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚²

概要: エネルギーハーベスト(環境発電)型無線センサネットワークでは, 得られる電力が環境に依存して不安定であるという問題が存在する. 本稿では, 電源が不安定である環境下でも高いデータ収集率を実現するレートレス符号化を用いたデータ収集プロトコル「Burnet」を提案する. Burnet では, 過去に発生したセンサデータや他ノードから受信したセンサデータを複数選択して XOR 演算することにより符号化パケットを生成して送信する. シンクノードへの経路の途中のノードにおいて電力の変動により, 一部のセンサデータが損失したとしても, シンクノードでは, 受信した複数の符号化パケットから損失したセンサデータを復元する. 計算機シミュレーションによって Burnet を評価した結果として, 既存の環境発電型無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコルよりも高いデータ収集率を達成できることを示す.

Design of Rateless Code for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

YUKI INABA¹ SYUNSUKE SARUWATARI¹ TAKASHI WATANABE²

1. はじめに

無線センサネットワークの研究においては, 電池駆動を前提として低消費電力性を目的とした MAC プロトコルやルーティングプロトコルが検討されている. しかしながら, 電池は寿命を持っている. したがって無線センサネットワークを空間に埋め込んで長期運用するためには, 環境から得たエネルギーでセンサノードを駆動させる環境発電型の無線センサネットワークの実現が不可欠である.

環境発電型無線センサネットワークの実現に向け, 得られる電力に適応的に動作するデータ収集プロトコルやしたり, 得られる電力に応じて再送回数を制御したりするデータ収集プロトコルが提案されてきた [1-3]. しかしながら, これらのデータ収集プロトコルでは, 得られるエネルギー量が急激に変化した場合に, プロトコルで想定しているエネルギー量と実際のエネルギー量が異なるため, データ収

集効率が悪くなる問題があった.

このような観点から, 本稿では, センサデータにアプリケーション層でレートレス符号化を行うことで環境から得られるエネルギーが急激に変化した場合でも高いデータ収集率を実現するデータ収集方式「Burnet」を提案する. Burnet では, 各センサノードは過去に自分が送ったフレームを複数組み合わせるレートレス符号化したフレームである符号化フレームを生成して送信する. 符号化フレームを受信したセンサノードは, 符号化フレームに手を加えずにシンクノードへと中継する. 複数の符号化フレームを受け取ったシンクノードは, 受信した符号化フレームから元のセンサデータを抽出する. 計算機シミュレーションによって Burnet を評価した結果, 既存の Probabilistic Retransmission (PRT) やシンプルフラッディングよりも高いデータ収集効率を発揮できることを示す.

本稿の構成は以下のとおりである. まず, 2 節で, 現在の無線センサネットワークで行われているセンサノードや通信プロトコルの研究開発を概観し, 本研究の位置付けを明らかにする. 次いで 3 節では, レートレス符号化を用いた環境発電型無線センサネットワークのデータ収集プロト

¹ 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University

² 大阪大学情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

コル「Burnet」を示す．Burnet の評価環境を 4 節で，評価結果を 5 で示す．最後に 6 節で本稿のまとめとする．

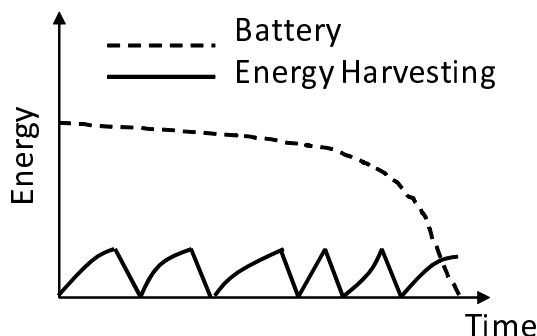


図 1 各センサノードのエネルギー量の変化

2. 関連研究

無線センサノードを環境から得た電力で駆動することでバッテリー交換が不要となり，大量のセンサノードを広域に配置したセンサネットワークが構築できる．センサノードを大量かつ広域に配置することで，広大な農場の日照状況を取得して日照量と農作物の生育状況の関係を把握することができる．また，広域での日照状況の測定は森林のエコシステムの状態の指標として用いられる林冠閉鎖率の測定にも応用できる [4]．ビニールハウスにおいては，温湿度の制御 [5] や照度センサを用いて光透過率からの植物の生育度推定 [6] などにも利用できる．これらのアプリケーションは，センサノード数が多く，全てのセンサノードからの情報を定期的に収集するものの，時間的な制約が緩いという特性を持っている．

環境から電力を取得する場合，場所や時間によって電源が不安定になる．例えば，太陽電池を用いて光から電力を得て，広大な農場で日照状況を収集するアプリケーションを想定した場合，各センサノード上空の雲の状態によって得られる電力にばらつきが生じる．また，振動から電力を得るデバイスを一般家庭で用いた場合，外を通るトラックや人の動き，洗濯機などの多くの振動源が存在する昼間には安定した電力を得ることができると考えられる．一方で，人々が寝静まる深夜では振動源が少なくなり，得られる電力は減少する．

環境から電力を取得する際に電源が不安定になるという問題に対し，2 次電池を利用して電力を安定化する試みがなされている．ZebraNet [7]，LUSTER [8]，Trio [9] では，太陽電池から得られた電力を一度 2 次電池に蓄えることで，1 次電池のみを用いた場合よりも長期間データ収集することを可能としている．

しかしながら，2 次電池を用いた場合では，充電回路が複雑化することによるセンサノードの製造コストの増加，サイズの肥大化，2 次電池の寿命などの問題が生じる．例

えば，ZebraNet や LUSTER の 2 次電池は，太陽電池から取得した電力で充電しながら利用されるため，充放電サイクルの寿命から 1~2 年で使用不可能となる．

そこで筆者らは，発電したエネルギーを劣化のほとんではないスーパーキャパシタなどのデバイスに一時的にエネルギーを保存するバッテリーレスでの動作に着目している．図 1 にバッテリー駆動のセンサノードと環境発電駆動のセンサノードのエネルギー量を示す．バッテリー駆動のセンサノードでは，バッテリーがなくなるまでは一定の電力を使用することができる．一方で，環境発電型のセンサノードでは，電力の充電と消費を繰り返す不安定な動作モデルを持つ．

文献 [10-14] では，環境発電型の無線センサネットワークにおいて，シングルホップを前提として待ち行列理論等を用いて MAC プロトコルの理論解析がなされている．例えば，文献 [13] では，得られる電力量に応じて送信電力と送信レートを適切に制御することでシングルホップでのスループットが向上することが示されている．

本研究では，観測範囲の広さと電波伝搬経路の多様性からマルチホップの環境発電型無線センサネットワークを対象とする．環境発電によって電力供給が不安定な状況でのマルチホップ通信を考えた場合，各センサノードは周囲のセンサノードが送信時に受信可能であるか，充電中かを把握することが困難となる．そのため，通信相手の状態を把握しなくとも通信範囲内のいずれかのセンサノードがパケットを受信できるようにフラッディングベースの通信を行う [1, 2]．

フラッディングベースの通信プロトコルを考えた場合，センサノード上のメモリの制約を考える必要がある．バッテリーレス無線センサネットワークでは，環境から得られる電力に制限があるため，できるだけ低消費電力でセンサノードを駆動することが求められるからである．一般的に，CPU では少ないメモリを搭載したものの低消費電力で動作する．例えば，フラッディングプロトコルとしてシンプルフラッディング [15] を用いた場合，メモリの制約から重複チェック用のテーブルやキューサイズを小さくすると受信キューが溢れて配送されるパケットに偏りが生じるといったパケットキュー詰まり問題が発生する．

パケットキュー詰まり問題の例として，図 2 にセンサノードが密集している場合の各ノードの受信キューの状態を示す．説明の簡略化のために，各ノードは 2 つのパケットを保持できる受信キューを備えていたとする．まず，ノード A がパケットをフラッディングするとノード D，ノード E，ノード F がノード A からのパケットを受信キューに挿入する．次にノード B がパケットをフラッディングすると，ノード A の時と同様にノード D，ノード E，ノード F がノード B からのパケットを受信キューに挿入する．この状態で，ノード D，ノード E，ノード F の受信キューは全部埋まっている．そのため，ノード C がパケッ

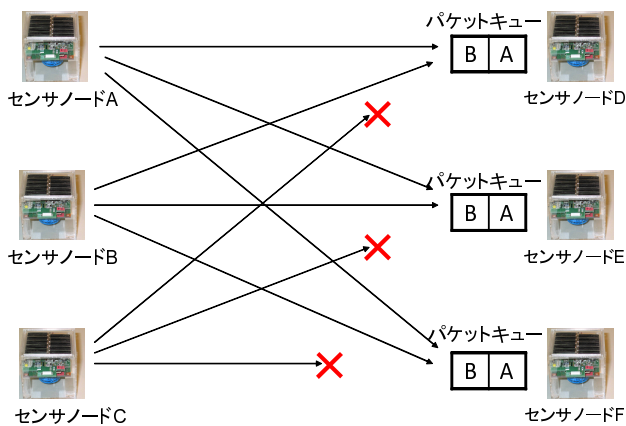


図 2 パケットキュー詰まり問題

トをフラッディングしようとしてもノード D, ノード E, ノード F の受信キューが溢れており, ノード C のパケットはフラッディングされない. ノード A とノード B のパケットはノード D, ノード E, ノード F により再度フラッディングされるのでノード A とノード B のパケットはネットワーク全体にさらに広がり, ノード C のパケットがよりシンクノードまで到達し辛い状況になる. また, 重複チェック用のテーブルサイズに制限がある場合には同じパケットを何度も受け取ってしまうことになり, ネットワーク上でのパケットの偏りがより顕著になる. これまで提案されてきたフラッディング [1, 2, 16, 17] でも同様に重複チェック用のテーブルと受信キューを持っているため, 他のフラッディングを用いたとしても同様の問題が発生すると考えられる.

また, 既存のマルチホップの環境発電型センサネットワークを対象とした通信プロトコルでは [1-3], エネルギーの変化量が規則的でゆるやかな環境を想定して, 周囲のノードの動作を予測することで自ノードの動作を決定している. 例えば, [1] では, 得られるエネルギーの平均が一定であるポアソン分布に従うときにスループットが最大となる各ノードの必要なエネルギーストレージサイズを算出している. しかしながら, エネルギーの変動は予測できるに限らない. 例えば, 太陽発電パネルを用いている場合には空が突然曇ることもありうる.

予測不能な発電エネルギーと似た挙動を示すのがチャネル状態である. チャネルも, 周囲のデバイスの状況や環境の変化によって急激に変動する. このような不安定なチャネル状態でも通信容量を使い切るための手法として, レートレス符号化を用いる試みが進められている [18-21]. レートレス符号化では, 複数の異なったシンボル情報を持つ符号化パケットを生成し続け, 受信ノードが復号できるまで符号化パケットを送信する. 文献 [20] では, レートレス符号化を用いた方式でチャネル状態が全知であるという前提の最適方式と同等のスループットを達成している.

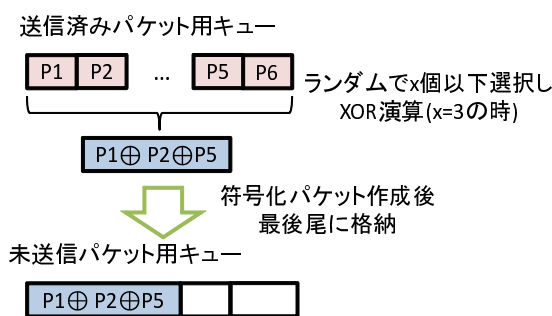


図 3 センサノードのパケットキュー



図 4 符号化パケットのフォーマット

3. 提案方式: Burnet

2. での議論を基に, 本稿では, チャネルが変動した場合でも高いスループットを実現するレートレス符号化の考え方を取得できるエネルギーが変動する環境発電型無線センサネットワークに適用することを目指す. 具体的には, 環境発電型無線センサネットワークにおけるレートレス符号化を用いたデータ収集プロトコル「Burnet」を提案する. Burnet は電力の不安定さによって発生するパケット損失や重複パケットに対してレートレス符号化を適用することで, パケット到達率を向上する. パケット到達率とは, 発生したパケット数に対してシンクノードに届いたユニークなパケット数の割合である. 各センサノードが電力に余力がある限り, 異なるパケット情報を持つレートレス符号化パケットを生成することで, 重複パケットによる無駄な通信を削減する. また, パケット損失が発生したとしても, 符号化パケットから損失したパケットの復号を可能とする.

3.1 センサノードの動作: 符号化

図 3 に, 各センサノードが具備しているパケットキューを示す. 各センサノードは未送信パケット用キューと, 送信済みパケット用キューの 2 種類のパケットキューを持つ. 未送信パケット用キューでは, 未送信パケットを格納している. 送信済みパケット用キューは, 送信済みのパケットを格納している. 図 4 に, Burnet で用いるパケットのフォーマットを示す. 生成されたパケットのフォーマットはヘッダに符号化されたパケットのセンサノード ID とシーケンス番号を持ち, ヘッダの後に符号化後のデータを持つ.

各センサノードは発生したパケットを未送信パケット用キューの最後尾に格納する. 送信状態になったとき, 未送信パケット用キューの先頭からパケットをブロードキャスト送信する. 各センサノードは未送信パケット用キューのパケットを送信した後, 送信パケットを送信済みパケッ

ト用キューに格納する。もし送信済みパケット用キューに空きがなくなった場合、キューの先頭からパケットを削除する。送信状態に入る前に、未送信パケット用キューが空の場合、各センサノードは送信済みパケット用キューに格納されているパケットのうちランダムに K 個以下を選択し、XOR 演算により符号化パケットを生成する。未送信パケット用キューが空の時のみ符号化するのは、符号化パケットを生成しすぎることによって発生するキュー詰まり問題を避けるためである。生成した符号化パケットは未送信パケット用キューの最後尾に格納する。各センサノードが未送信パケット用キューから符号化パケットを送信した場合、送信した符号化パケットを送信済みパケット用キューには格納せず削除する。送信されたパケットをセンサノードが受信した場合、パケットが発生した時と同様に未送信パケット用キューの最後尾に格納する。未送信パケット用キューに空きがない場合では、直前に受信したパケットを破棄する。

3.2 シンクノードの動作: 復号化

シンクノードでは、受信した符号化パケットから以下の手順でセンサデータを抽出する。 $K = 3$ とした場合、センサノードは 3 個以下のパケットを符号化する。図 3 のようにセンサノードが送信済みパケット用キューに格納されているパケット $P1, P2, P5$ を選択して符号化した場合、パケットのフォーマットはヘッダに各 $P1, P2, P5$ のセンサノード ID とシーケンス番号を持ち、ヘッダの後ろに $P1, P2, P5$ を XOR 演算したデータを持つ。シンクノードでは受信パケット同士のセンサノード ID とシーケンス番号を比較して、共通のセンサノード ID とシーケンス番号を持つパケット同士を XOR 演算して、新しいパケットを生成する。ただし、復号の複雑化を避けるため、新しく生成されるパケットの要素パケット数は K 個以下とする。要素パケット数とは、符号化パケットに含まれているパケットの種類の数である。

復号例を表 1 に示す。ここでの R はシンクノードが受信したパケット、 P は符号化されていないパケット、 D は復号することで生成した新しいパケットを意味する。表 1 では、シンクノードは受信パケット $R1, R2, R3, R4, R5$ を持つ。それぞれの受信パケットは表 1 のように 3 個以下のパケットの情報を持っている。まず $R1$ と $R2$ を比較する。 $R1$ と $R2$ は $P2$ と $P5$ の共通項を持つため、XOR 演算を行うことで $P1$ が復号される。次に、 $R1$ に対して $R3, R4, R5$ を比較し、共通項がある場合のみ XOR 演算を行い、新しいパケットの組み合わせの復号パケットを生成する(例: $D1, D2...$)。 $R1$ が終了した後、次のステップでは生成した復号パケットも比較対象に加え、 $R2$ に対して $R3, R4, R5, P1, D1$ との比較を行う。

このように新しく生成した復号パケットも含め総当たり

表 1 シンクノードにおける復号例

受信パケット	P1	P2	P3	P4	P5	復号パケット
R1						
R2						
R3						
R4						
R5						
						$P1(R1 \oplus R2)$
						$D1(R1 \oplus R3)$
						$D2(R2 \oplus R3)$
						$D3(R2 \oplus D1)$
						$D4(R3 \oplus R5)$
						$P3(R4 \oplus R5)$
						$P2(R4 \oplus D4)$
						⋮
						$P5(D2 \oplus P3)$

で比較する。生成するパケットの要素が 4 つ以上または既に存在するパケットの要素と同一でない限り新しいパケットの生成を繰り返す。比較を繰り返した結果、5 つの受信パケットから 5 つのパケットの復号が可能となる。

3.3 動作例

図 5 に Burnet の動作例を示す。

- (1) ノード B はセンサノード A、センサノード A はシンクノードにパケットの送信が可能であるとする。ノード A はパケット $d1$ を、ノード B はパケット $d2$ を送信キューに保持している。
- (2) ノード A がパケット $d1$ をシンクノードに対して送信する。パケットの送信は成功し、シンクノードはパケット $d1$ を受け取る。送信が成功するか失敗するかに問わず、ノード A はパケット $d1$ を送信済みキューに格納する。
- (3) ノード B がパケット $d2$ をノード A に対して送信する。パケットの送信は成功し、パケットを受信したノード A はパケット $d2$ を送信キューに挿入する。送信が成功するか失敗するかに問わず、ノード B はパケット $d2$ を送信済みキューに格納する。
- (4) ノード A がシンクノードに対してパケット $d2$ を送信する。パケットの送信は失敗する。送信が成功するか失敗するかに問わず、ノード A はパケット $d2$ を送信済みキューに格納する。
- (5) ノード A は、送信済みキューからパケット $d1$ とパケット $d2$ の排他的論理和を取って新たなパケット $d1 \wedge d2$ を生成し、送信キューに挿入する。
- (6) ノード A はパケット $d1 \wedge d2$ をシンクノードに対して送信する。パケットの送信は成功する。シンクノードは過去に受け取ったパケット $d1$ と受信したパケット $d1 \wedge d2$ の排他的論理和を取り、パケット $d2$ を復号す

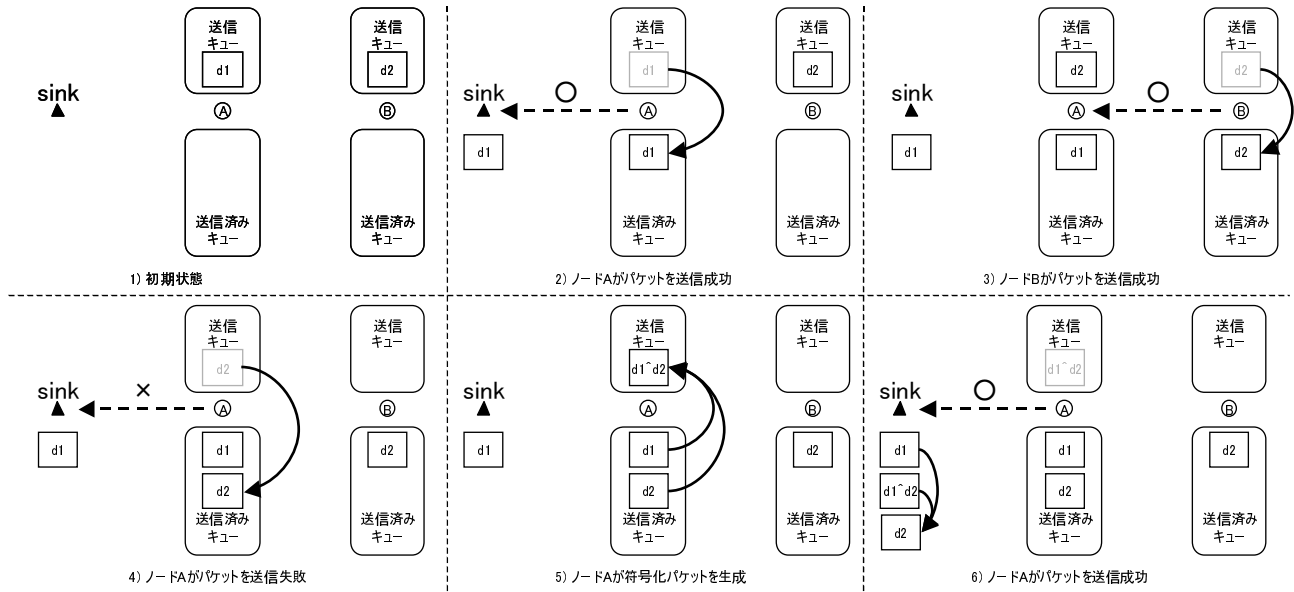


図 5 Burnet 動作例

る．これにより，シンクノードはパケット d1 と d2 の受信が完了する．

4. 評価環境

Burnet の基本性能を検証することを目的として，計算機シミュレーションによるパケット到達率を評価した．シミュレーションでは，OMNeT++ [22] を用いた．シンクノードは安定した電力供給があるものとし，常に受信待機している．各評価パラメータに対してシミュレーションを 10 回実行して得られた結果の平均値を算出した．

表 2 にシミュレーションの諸元を示す．無線通信は無線モジュールに CC2420 を用いた場合を想定し，送信電力は 0 [dBm]，ビットレートは 250 [kbps] とした．電波伝搬モデルは現実に近い電波伝搬モデルである [3] を用いた．キャプチャ効果 [23] を再現するため，衝突モデルでは干渉が累積的に加算し，1 パケットの受信期間全体で SN 比が一定以上保てる場合にのみ受信する．受信期間で干渉波によって一部でも SN 比が下回ったときに衝突が発生する．以上の条件下での電波の最大到達率は約 68 [m] となる．

4.1 環境発電モデル

充電エネルギーの時間的変化は発電デバイスによって異なると考えられる．充電エネルギーの時間的変化を評価パラメータとするために，充電レート R [J/s] を T_{charge} [sec] 毎に以下の式に従って変化させるものとした．のとした．

$$R = 2R_{avg}\sigma \quad (1)$$

R_{avg} は平均充電レート [J/s]， σ は 0 から 1 の範囲で発生する一様分布の乱数である．

図 6 に R_{avg} が 10 [mJ/s]， T_{charge} が 1.0 [sec] の場合の充電レート R を示す． T_{charge} が大きい場合，短期的にみ

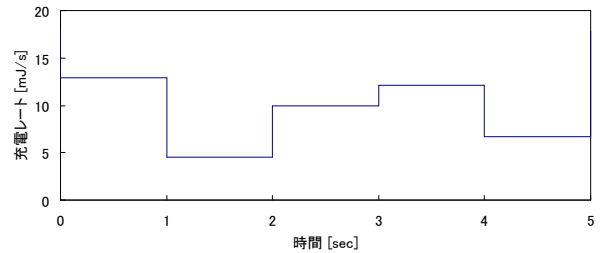


図 6 T_{charge} が大きい場合の充電レート R

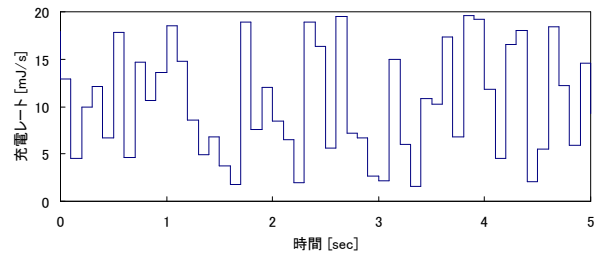


図 7 T_{charge} が小さい場合の充電レート R

ると通信プロトコルが影響を受ける充電エネルギーの変化は小さいものの，通信プロトコルから見た場合の取得エネルギーは平均充電エネルギー R_{avg} と異なって見え， R が変化した場合に受ける影響も大きい．

図 7 に R_{avg} が 10 [mJ/s]， T_{charge} が 0.1 [sec] の場合の充電レート R を示す． T_{charge} が小さい場合，短期的にみると充電エネルギーの変化は大きいものの，スーパーキャパシタに一時的に電力を蓄えているので通信プロトコルから見た場合の取得エネルギーは R_{avg} に近づく．

4.2 MAC プロトコル

図 8 にセンサノードの通信プロトコルを示す．本稿での

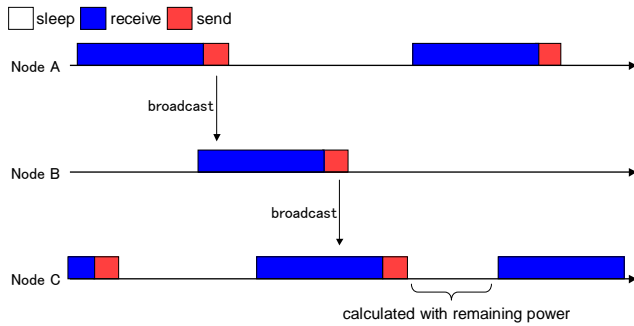


図 8 センサノードの MAC プロトコル

表 2 シミュレーション諸元

ビットレート	250[kbps]
送信電力	0[dBm]
パケット発生頻度	0.01[packets/sec]
電波伝搬モデル	文献 [3]
衝突モデル	累積的干渉

通信プロトコルは充電状態，送信状態，受信状態の 3 つの状態をもつ．充電状態では，環境発電によってパケットの送受信に必要なエネルギー E_{node} [J] を充電する．パケットの送受信に必要なエネルギー E_{node} は送信時の消費電力 P_{tx} [W] と送信時間 T_{tx} [sec] を乗算したものに，受信時の消費電力 P_{rx} [W] と受信時間 T_{rx} を乗算したものを足したものとなるため，

$$E_{node} = P_{tx}T_{tx} + P_{rx}T_{rx} \quad (2)$$

となる．各センサノードでは，充電状態において，式 1 に示した充電レート R [J/s] に基づいてエネルギーを充電し， E_{node} 分のエネルギーが蓄えられたら受信状態に移行する．

受信状態の時のみ，センサノードはパケットを受信することができる．受信状態において受信時間 T_{rx} [s] 経過した後，パケット送信キューにパケットが格納されている場合は送信状態，パケット送信キューにパケットが格納されていない場合は充電状態に遷移する．受信時間が短すぎるとセンサノードがパケットの受信に失敗し，長すぎると充電状態が長くなってパケット送信の機会が減少する．今回の評価では $T_{rx} = 1$ [sec] に固定した．

送信状態では，パケット送信キューの先頭に格納されているパケットを 1 つ送信する．送信時間 T_{tx} はパケットサイズと物理層の伝送レートから算出する．例えば，パケットサイズが 200 [bit] と物理層の伝送レートが 250 [kbps] の場合， $T_{tx} = 0.8$ [msec] となる．送信状態終了時，送信したパケット送信キュー先頭のパケットを破棄して充電状態へ遷移する．

4.3 評価対象のデータ収集プロトコル

Burnet の性能を相対的に評価するため，次の 3 つの通信プロトコルをシミュレータ上に実装した．各方式のパケットはペイロードが異なる．

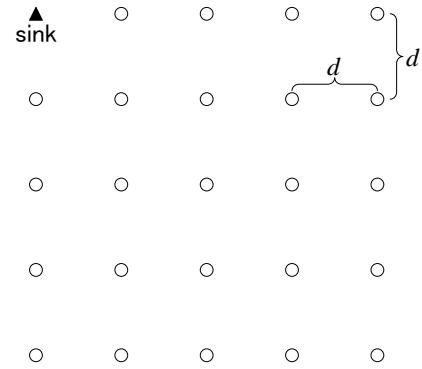


図 9 格子状トポロジ

1 つ目は，シンプルフラッディングである．何も工夫しない場合のベースラインとなる．ペイロードはそれぞれ 1 つのパケットの ID，シーケンス番号，センサ値を持つため，パケット長は 200 [bit] である．発電エネルギーに対して何も工夫しないため，性能は最も悪いことが予想される．

2 つ目は，PRT である．PRT とは，ノードの稼働時間からパケット受信成功確率を計算し，周囲のノードの受信成功確率に基づいて適切なパケットの送信回数を計算する方式である．文献 [2] の方式を想定している．PRT のペイロードは，パケット受信確率，パケットの ID，シーケンス番号，センサ値を持つため，パケット長は 208 [bit] である．周囲のノード数と各ノードのエネルギー発電量に応じて再送回数を決定しているため，シンプルフラッディングよりも高い性能を発揮すると予想される．一方で，再送によって同じパケットを繰り返し送信するのでパケット詰まり問題が発生しやすくと予想される．

3 つ目は，提案手法である Burnet である．Burnet のペイロードは，3 つのパケットの ID とシーケンス番号，1 つのセンサ値を持つため，パケット長は 232 [bit] である．

5. 評価結果

5.1 格子トポロジでの評価

図 9 に格子トポロジを示す．評価トポロジでは，センサノードを等間隔に格子状に配置した．各センサノードの間隔は d [m] である．左上のノードをシンクノードとした．充電レートに対するパケット到達率の評価

Burnet の基本特性を評価することを目的として，平均充電レート R_{avg} に対するパケット到達率を評価した．各ノード間の間隔 d は 40 [m] である．充電エネルギー R が変化する時間間隔 T_{charge} は 0.1 [sec] とした．図 10 に充電レートに対するパケット到達率を示す．

図 10 より，次の 3 つのことが分かる．1 つ目は，Burnet の性能が最も高いことが分かる．レートレス符号化によって無駄なパケットが送出されないからであると考えられる．2 つ目は，シンプルフラッディングの性能が最も低いことである．発電エネルギーが多い場合には同じパケット

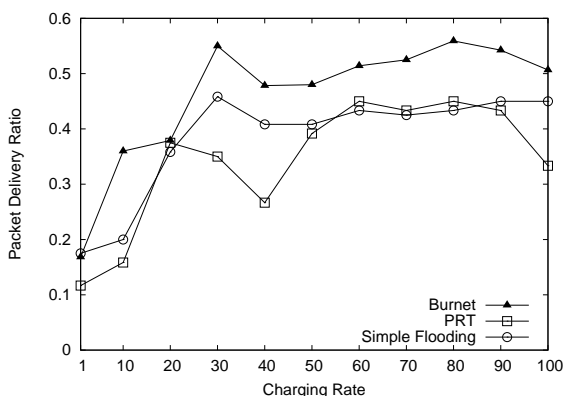


図 10 充電レートに対するパケット到達率 ($d = 40$ [m])

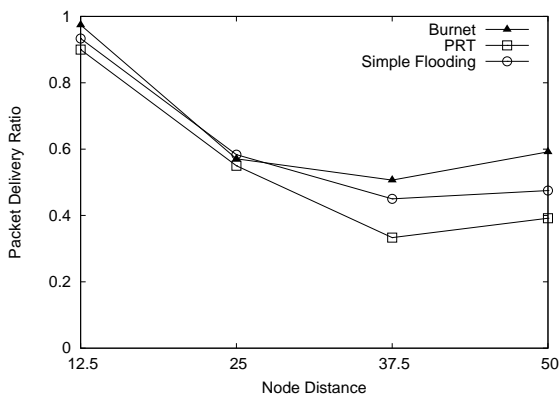


図 11 ノード間の距離に対するパケット到達率 ($E_{charge} = 10$ [mW])

がネットワークに広がることでパケット詰まり問題が発生するからだと考えられる。発電エネルギーが低い場合には単にフラッディングするだけでは隣接ノードがパケットを受信する可能性が低いからだと考えられる。

ノード間の距離に対するパケット到達率の評価

格子トポロジではノード間の距離 d が変化することで、通信範囲に存在するノードの数が増えるため、パケット到達率も変わると考えられる。このような観点から、ノード間の距離を変えた場合の評価を行った。

図 11 にノード間の距離に対するパケット到達率を示す。図 11 より次の 3 つのことが分かる。1 つ目は、ノード間の距離が大きい時には Burnet のパケット到達率が高いことである。格子トポロジではノード間の距離が大きくなることでホップ数が大きくなり、センサノードからシンクノードに届くまでの経路が多様化して生成される符号化パケットにも多様性が生じるからであると考えられる。2 つ目は、ノード間の距離が小さい場合には 3 つの方式に大きな差が見られないことである。センサノードからシンクノードに直接届くパケットが増加するからであると考えられる。3 つ目は、全てのプロトコルにおいてノード間の距離が広がるにしたがってパケット到達率が一度下がるものの、再び上昇することである。ノード間距離が広がることで衝突率

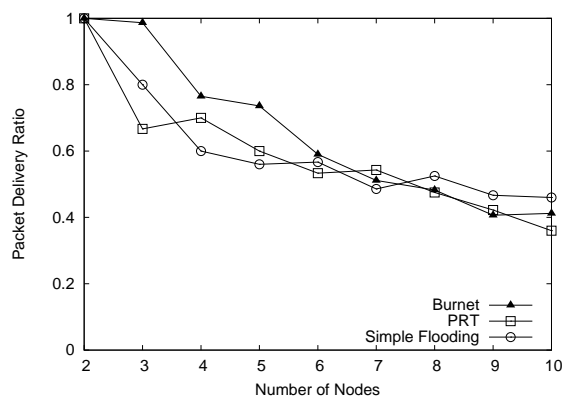


図 12 直線トポロジにおけるノード数に対するパケット到達率の評価

が下がっているからではないかと考えている。

5.2 直線トポロジでの評価

ホップ数が Burnet の性能に与える影響を評価することを目的として、直線トポロジでの評価を行った。図 12 に直線トポロジを示す。評価トポロジでは、センサノードを 50 [m] 間隔で直線状に配置した。左端がシンクノードである。

図 12 に直線トポロジにおけるノード数に対するパケット到達率を示す。図 12 より、ホップ数が少ないときには Burnet が最も高いパケット到達率を実現していることが分かる。しかしながら、ホップ数が大きい場合には Burnet のパケット収集率はシンプルフラッディングよりも悪くなる。ホップ数が大きい場合には符号化パケットが増加し、復号化の成功率が低くなるからだと考えている。

6. おわりに

本稿では、環境発電型無線センサネットワークにおいて高いデータ収集効率の達成するレートレス符号を用いたデータ収集方式 Burnet を提案した。Burnet は過去に送信した複数のセンサデータから符号化フレームを生成し、送信することで、元のセンサデータを抽出することが可能である。計算機シミュレーションによって Burnet を評価した結果として、シンプルフラッディングや既存研究である PRT [2] よりも高いデータ収集効率を実現できることを示した。

謝辞

本研究は、挑戦的萌芽研究 (24650026) の助成を受けて行った。

参考文献

- [1] Zhang, S. and Seyedi, A.: Analysis and Design of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks with Linear Topology, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'11)*, Kyoto, Japan, pp. 1-5 (2011).

- [2] Yoshida, M., Kitani, T., Bandai, M., Watanabe, T., Chou, P. H. and Seah, W. K. G.: Probabilistic Data Collection Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol. 11, No. 2/3, pp. 82–96 (2012).
- [3] Zeng, K., Ren, K., Lou, W. and Moran, P. J.: Energy Aware Efficient Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks with Environmental Energy Supply, *Wireless Networks*, Vol. 15, No. 1, pp. 39–51 (2009).
- [4] Mo, L., He, Y., Liu, Y., Zhao, J., Tang, S. J., Li, X. Y. and Dai, G.: Canopy Closure Estimates with GreenOrbs: Sustainable Sensing in the Forest, *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09)*, Berkeley, California, pp. 99–112 (2009).
- [5] 小林悠一, 鈴木雄也, 鈴木良典, 今原淳吾, 峰野博史: センサネットワークを用いた温湿度制御システムの研究, 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol. 2013-UBI-37, No. 24, pp. 1–8 (2013).
- [6] 下城拓也, 森戸 貴, 鈴木 誠, 李 斗煥, 近藤 勇, 福田直也, 森川博之: トマト群落内光透過率可視化に向けた無線センサネットワーク, 信学技報, IN2012-215, Vol. 112, No. 464, pp. 365–370 (2013).
- [7] Zhang, P., Sadler, C. M., Lyon, S. A. and Martonosi, M.: Hardware Design Experiences in ZebraNet, *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland, pp. 227–238 (2004).
- [8] Selavo, L., Wood, A., Cao, Q., Sookoor, T., Liu, H., Srinivasan, A., Wu, Y., Kang, W., Stankovic, J., Young, D. and Porter, J.: LUSTER: Wireless Sensor Network for Environmental Research, *Proceedings of the 5th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'07)*, Sydney, Australia, pp. 103–116 (2007).
- [9] Dutta, P., Hui, J., Jeong, J., Kim, S., Sharp, C., Taneja, J., Tolle, G., Whitehouse, K. and Culler, D.: Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Deployments, *Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)*, pp. 407–415 (2006).
- [10] Iannello, F., Simeone, O. and Spagnolini, U.: Dynamic Framed-ALOHA for Energy-Constrained Wireless Sensor Networks with Energy Harvesting, *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'10)*, Miami, Florida, pp. 1–6 (2010).
- [11] Tadayon, N., Khoshroo, S., Askari, E., Wang, H. and Michel, H.: Power Management in SMAC-based Energy-harvesting Wireless Sensor Networks using Queuing Analysis, *Journal of Network and Computer Applications*, pp. 1–10 (2012).
- [12] Tacca, M., Monti, P. and Fumagalli, A.: Cooperative and Reliable ARQ Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 7, pp. 2519–2529 (2007).
- [13] Yang, J., Ozel, O. and Ulukus, S.: Optimal Packet Scheduling in a Broadcast Channel with an Energy Harvesting Transmitter, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'11)*, Kyoto, Japan, pp. 1–5 (2011).
- [14] Reddy, S. and Murthy, C. R.: Profile-based Load Scheduling in Wireless Energy Harvesting Sensors for Data Rate Maximization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'10)*, Cape Town, South Africa, pp. 1–5 (2010).
- [15] Tanenbaum, A. S.: *Computer Networks (4th Edition)*, Pearson Education (2002).
- [16] Sun, Y., Gurewitz, O., Du, S., Tang, L. and Johnson, D. B.: ADB: An Efficient Multihop Broadcast Protocol based on Asynchronous Duty-cycling in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09)*, Berkeley, California, pp. 43–56 (2009).
- [17] Guo, S., Gu, Y., Jiang, B. and He, T.: Opportunistic Flooding in Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Networks with Unreliable Links, *Proceedings of the 15th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'09)*, Beijing, China, pp. 133–144 (2009).
- [18] Gudipati, A. and Katti, S.: Strider: Automatic Rate Adaptation and Collision Handling, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'11)*, Tronto, Canada, pp. 158–169 (2011).
- [19] Gudipati, A. and Katti, S.: AutoMAC: Rateless Wireless Concurrent Medium Access, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, Istanbul, Turkey, pp. 257–268 (2012).
- [20] Perry, J., Iannucci, P. A., Fleming, K., Balakrishnan, H. and Shah, D.: Spinal Codes, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'12)*, Helsinki, Finland, pp. 49–60 (2012).
- [21] Iannucci, P., Perry, J., Balakrishnan, H. and Shah, D.: No Symbol Left Behind: A Link-layer Protocol for Rateless Codes, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, pp. 17–28 (2012).
- [22] Varga, A.: The OMNeT++ Discrete Event Simulation System, *Proceedings of the 15th European Simulation Multiconference (ESM'01)*, Prague, Czech Republic, pp. 319–324 (2001).
- [23] Takagi, H. and Kleinrock, L.: Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 32, No. 3, pp. 246–256 (1984).