

特別研究報告

題目

受信端末駆動型無線マルチホップネットワークにおける
残余電力に基づいた長寿命化手法の提案

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

Damdinsuren Chuluunsuren

平成 22 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

受信端末駆動型無線マルチホップネットワークにおける
残余電力に基づいた長寿命化手法の提案

Damdinsuren Chuluunsuren

内容梗概

センサネットワークのように容量の小さな電池によって動作する無線マルチホップネットワークにおいては、消費電力を抑制し、長時間稼働できることが重要な課題である。非同同期間欠動作方式は、それぞれのノードが非同期にアクティブ・スリープの間欠動作をすることによって、消費電力を抑制することができる。特に、データ受信側のノードが間欠的に ID を送信することによって通信を開始する受信端末駆動型通信方式の一つである Intermittent Receiver-Driven Transmission (IRDT) 方式は、トポロジーが密で通信頻度の低いネットワークに適した方式であることが明らかにされている。IRDT を適用することによってネットワーク全体の平均消費電力は抑制できるが、端末間の消費電力の差異は依然として存在する。そのため、多くのノードの電力が残っているにもかかわらず、消費電力が最も大きなノードの残余電力が枯渇することによってネットワークの一部が停止し、これによってネットワーク全体の寿命が決定される。したがって、ノード間の残余電力の平均化を実現することができれば、ネットワーク寿命をさらに延ばすことが期待できる。そこで本報告では、IRDT による無線マルチホップネットワークを対象として、ネットワークを構成する各ノードの残余電力情報を活用することで、その平均化を行ない、ネットワーク寿命を延ばすことを試みる。まず、各ノードが自己の残余電力に応じてスリープ時間を制御することによって、電力消費を抑制する方式を提案し、その評価を行う。この方法により、既存の IRDT よりネットワーク寿命を長くすることができるが、ネットワーク全体のスリープ時間が長くなることによるパケット収集率の低下が問題となった。そこで、受信側ノードが周期的に送信する ID パケットに自己の残余電力情報を付加することによって、近隣のノードの残余電力の状況を取得することにより、残余電力の平均化を実現する制御方式を提案する。シミュレーションによる評価の結果、パケット収集率や遅延などのネットワーク性能を維持したまま、ネットワーク寿命を約 44% 伸ばせることが明らかとなった。

主な用語

センサネットワーク、残余電力、負荷分散、長寿命化

目次

1	はじめに	5
2	受信端末駆動型通信方式 IRDT の概要	8
2.1	データリンク層	8
2.2	ネットワーク層	8
2.3	現状の IRDT 方式における問題点	10
3	自己の残余電力情報を活用した制御によるネットワークの長寿命化	14
3.1	自己の残余電力に基づく間欠周期制御	14
3.2	ルーティング方法の改良	16
3.3	ネットワークの性能低下問題	20
4	周囲ノードの残余電力に関する情報を活用した制御	23
4.1	残余電力情報の交換と管理	23
4.2	残余電力情報を活用したルーティング手法	23
4.3	残余電力情報に基づいた間欠周期の制御方式	25
5	おわりに	29
	謝辞	30
	参考文献	31

目 次

1	IRDT 方式の主なプロトコル	9
2	IRDT 方式における通信リンク確立	9
3	ネットワーク構成情報の例	11
4	シミュレーションに使用したネットワークモデルのトポロジー。各ノードで発生したデータパケットがマルチホップでシンクノードに伝送される。ノードの色は、シンクノードからのホップ数を表している。	12
5	各ノードの残余電力の状況 (ノード 12 の電力が枯渇した時点での残余電力) .	13
6	トポロジー	15
7	時間経過に対する各ノードの残余電力の変化	17
8	パケット発生率に対する基本性能	18
9	パケット発生率に対する基本性能	19
10	ルーティング R2 による残余電力の変化	21
11	300 秒ごとの区間内平均パケット収集率	22
12	前向きノードの残余電力の状況を考慮したルーティング手法 R3	24
13	R3 を適用した時の残余電力の変化	25
14	間欠周期の制御による負荷分散	27
15	周囲ノードの残余電力情報に基づいて、間欠周期を制御した時の残余電力の変化	28
16	T_{max} に対するパケット収集率の変動	28

表 目 次

1	シミュレーションパラメーター	15
2	ルーティング手法 R1 と R2 の比較	20
3	間欠周期を 0.3 s に固定した場合のネットワーク性能	22
4	間欠周期を残余電力に応じて制御した場合のネットワーク性能	22
5	ルーティング手法 R3 を適用した後のシミュレーション結果	25
6	間欠周期の最大値 $T_{max} = 1.5 s$ に設定した時のシミュレーション結果	26

1 はじめに

近年、無線ノード同士が自律的にネットワークを形成するアドホックネットワークに対する関心が強まっている。その中で、複数のセンサノードがアドホックにネットワークを形成するセンサネットワークでは、無線の利用によって特別なインフラストラクチャを必要とせず、センシング情報を収集・管理することが可能であり、その広い応用性に注目が集まっている。一方、センサノードの小型化や低コスト化などセンサネットワークにおいて解決すべき技術的課題は残っており、中でも容量が有限の電池によって動作するセンサノードにおいては、消費電力の低減化は重要な課題である。消費電力の低減化には様々なレイヤからのアプローチがあり、例えば、半導体技術の高度化や充電機器の追加、ノードにスリープ状態と起動状態を設けることで間欠的にデータを送受信するようなアクセス制御、通信距離を短くするためのマルチホップを前提としたルーティングアルゴリズム等が研究されている。

本報告では、間欠動作による低消費電力化を行う無線マルチホップネットワークを対象とする。すなわち、ノードが間欠的に動作状態となり、それ以外の時間帯はスリープ状態となることによって、消費電力を抑制するものである。ノードのスリープ状態時に消費される電力は、起動状態時の数百から数千分の一であり、通信を行わない場合にスリープ状態となることは消費電力の観点から有効であるが、通信を行う際には起動タイミングをノード間で制御する必要がある。間欠動作の制御方式は、同期式 [1, 2] と非同期式 [3-6] に分類できる。また、通信開始を通知するパケットを送信するノードがデータの送受信いずれを行うかによって、送信端末駆動型 [3-5] と受信端末駆動型 [6] の方式に分類される。いずれにおいても、任意のタイミングで起動して通信を行うため同期の維持は必要ないが、衝突を前提とした制御が必要となる。消費電力の観点において、同期式では周期的に比較的高い頻度でパケットを収集するシステムに有利で、非同期式はパケット収集の頻度が低く、任意のタイミングでパケットが発生するシステムに有利である。

本報告で対象としているアプリケーションは、電力メータなどトポロジーが密でパケット発生頻度が低いシステムを想定しており、このようなシステムには受信端末駆動型の IRDT (Intermittent Receiver-driven Data Transmission) 方式が消費電力の観点から適していることが明らかになっている [7]。しかし、対象システムに IRDT を適用した場合、平均消費電力の抑制は実現されるが、ノードごとの消費電力の差異は依然として存在する。すなわち、シンクからの距離が同じホップ数のノード群でも消費電力にばらつきがある。結局、消費電力が最も大きなノードから残余電力が枯渇しはじめ、そのノードの動作が停止してしまう。このような電力の枯渇が発生した場合には、システムを稼働し続けるために、電池の交換などの作業が必要となる。ネットワーク寿命をできるだけ延ばすためには、単に平均消費電力を抑制するだけでなく、消費電力が最も大きなノードの電力消費を可能な限り抑制するこ

とが必要である。

このような観点から残余電力情報に基づいたネットワークの負荷分散手法により、ネットワークの長寿命化する研究が多数なされている。まずは、ネットワーク全体をクラスタに分割し、残余電力情報に基づいて各クラスタヘッドを決定するような方式 [8-10] がある。[8] では、アドホック無線センサーネットワークのための低消費電力クラスタリング手法を提案している。この手法は、各ノードの残余電力と二次的パラメタの組み合わせた関数に従って、定期的にクラスタヘッドを選ぶ。この時には、ノードの配置や密度、ノードの能力や位置を意識しない。クラスタリング過程は、ネットワークポロジやノード数に関係なく $O(1)$ のオーダーで計算可能なので、プロトコルのメッセージ交換処理やクラスタリング処理によるプロトコルのオーバーヘッドは少ない。また、残余電力と二次パラメタの厳選によってクラスタヘッド間での負荷分散が実現できる。[9] では、クラスタ間のマルチホップ通信を実現したクラスタリング手法を提案している。また、各ノードの残余電力状況によって2つの上下セットに分割される。上セットには残余電力が大きいノードが入っており、この中からクラスタヘッドが選出される。下セットには、残余電力が少なくなったノードが入っており、これらのノードはセンサーの役割を担う。この手法は、ネットワークの負荷分散問題を解決して、標準のマルチホップ低エネルギー適応型のクラスタリングプロトコルと比べて、効率的であることが検証されている。本報告で対象としているネットワークでは、クラスタを形成した構成をとっていないため、これらのクラスタリングに基づく省電力手法を適用することは困難である。

また、データを収集するシンクまでの経路を、通信状況・消費電力コスト・残余電力情報などに基づいて計算し、最も適切な経路を選択するような方式 [11-13] がある。[11] では、アドホック無線センサーネットワークにおいて、ネットワークの寿命を最大化するルーティングアルゴリズムを提案した。電池がなくなるまでの時間、すなわちネットワークの寿命の最大化を目的とし、ルーティング問題を線形計画問題として定式化した。2つの終端ノードにおける通信電力消費率と残余電力レベルの両方を反映するリンクコストを用いて、最小コスト経路ルーティングアルゴリズムを提案している。[12] では、今までの主流だった消費電力が最も低い経路を選択するような手法は、ネットワーク寿命と長期の接続性の観点から最適ではないことを示している。そこで、ネットワーク寿命を最適化するために、残余電力や通信状況を考慮した複数の経路候補を計算し、その中からランダムに経路を選択するルーティング手法を提案している。しかしこれらの手法では、多数の経路情報を管理する必要があり、制御に要する計算量も多いため、対象とするネットワークのように能力が限定されたノードで実現することは困難が伴う。

そこで本報告では、IRDT方式に基づく受信端末駆動型無線マルチホップネットワークを対象として、残余電力に関する情報を活用することでネットワークの長寿命化を実現するた

めの方式を提案する。ここで提案する方式は、既存の IRDT に対する変更や機能追加をできるだけ少なくし、容易に実現できることを目指すものである。まず、各ノードが自己の残余電力に応じて間欠周期を制御することでネットワーク寿命を延ばす手法を提案しその評価を行う。この方式では、残余電力が少なくなったノードは、間欠周期を大きくすることで他ノードからのパケット受信を抑制する。その結果、負荷が集中していたノードの電力が枯渇するまでの時間を延ばすこととなり、ネットワーク全体の長寿命化が期待できる。さらに本報告では、より効率的な負荷と電力消費の分散を目指して、周囲ノードの残余電力に関する情報を活用した制御によりネットワーク寿命を延ばす手法を提案する。この方式は、各ノードが間欠的に送信する ID パケットに、自己の残余電力に関する情報を付加することによって実現できる。それぞれのノードは、隣接ノードからの ID パケットを受信することによって、周辺の残余電力状況を知ることができる。本報告では、このようにして取得した残余電力情報を活用したルーティング手法と、間欠動作の制御方式を提案し、その評価を行なう。これらの提案は、既存の IRDT に対するわずかな変更で実現可能なものである。

本報告は、以下のような構成となっている。初めに、2 章では IRDT 方式の基本動作とその概要について説明する。3 章ではノード自身が自己の残余電力情報を活用した制御について、4 章では周囲ノードの残余電力に関する情報を活用した制御について述べる。最後に、5 章では本報告の結果と今後の課題について述べる。

2 受信端末駆動型通信方式 IRDT の概要

ここでは IRDT 方式の基本動作について説明する。図 1 では、IRDT 方式の主なプロトコルとそれぞれの位置づけを示す。本章では、まず IRDT 方式におけるデータリンク層のプロトコルであるリンク確立手法と衝突回避について、次にネットワーク層のプロトコルである構成情報テーブル管理とルーティング手法について述べる。

2.1 データリンク層

各ノードは受信待機状態にある場合、図 2 に示すように間欠的に自身の ID を送信する。ID の送信後は短い受信待機状態を取った後にスリープ状態へと遷移し、一定時間スリープした後に再び自身の ID を送信するという動作を繰り返す。また、送信状態にあるノードは周辺のノードから ID を受信するまで待機し、適切な送信先ノードの ID を受信した場合にデータ送信要求 (SREQ) を返信する。この返信に対する ACK (RACK) が届けばデータの送信を行い、データに対する ACK (DACK) が届いたことを確認して通信を終了する。これらすべての通信は、常に CSMA/CA によって衝突回避を図っている。

図 2 では受信ノード 1 と受信ノード 2 が間欠動作を行っている。送信ノードは受け取った ID を確認し、ルーティングプロトコルに基づいて適切な送信先かどうかを判断する。図では、送信ノードが待ち受け状態になって、最初に獲得した ID であるノード 2 を宛先とした通信を開始している。このように、IRDT 方式では受信側から ID を通知することで、送信側が複数のノードを転送先として待ち受けることができ、信頼性の向上や ID 受信の待機時間の短縮が可能となっている。

2.2 ネットワーク層

IRDT 方式はマルチホップ転送を前提としており、各ノードはパケットの中継処理を行う。消費電力や遅延の増加を防ぐためには、宛先ノードまでのホップ数が最小となるような経路にパケットを転送することが望ましい。しかしながら、無線回線の品質劣化や輻輳、ノードの故障などの理由で、そのような経路に送れない場合が存在する。そこで IRDT 方式では、最小ホップ経路以外の迂回経路も柔軟に選択するようなルーティング方法を用いることで、信頼性の向上を図っている。

各ノードは構成情報テーブルを持っており、ネットワークの経路情報を定期的に交換することでテーブルを更新し、最新の構成情報を常に保持している。構成情報とは自分からそれぞれのノードまでの経由するノードの数のことをいう。以降では、経由するノードの数をホップ数と呼ぶ。このテーブルから各ノードはパケットの宛先となるシンクノードまでの

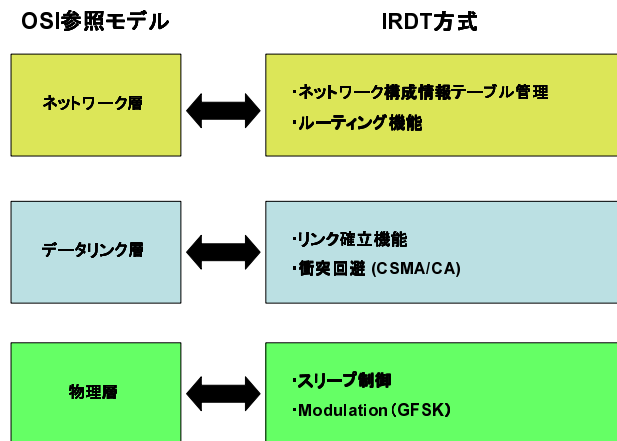


図 1: IRDT 方式の主なプロトコル

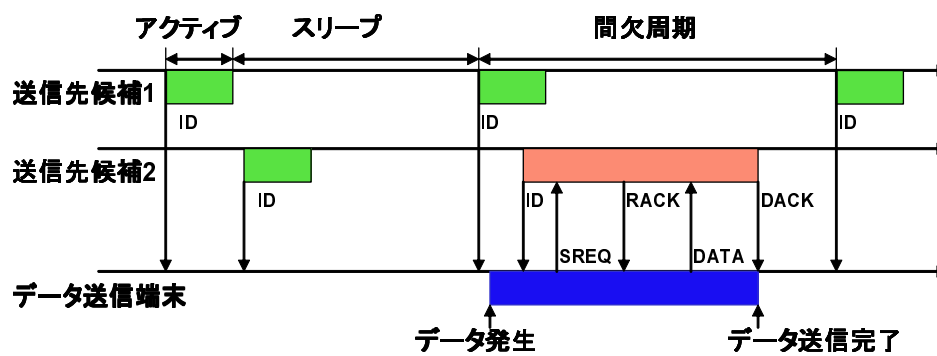


図 2: IRDT 方式における通信リンク確立

ホップ数を求めることができる。あるノード S から宛先ノード D までの最小ホップ数が H である時、ノード S に隣接するノードからノード D までの最小ホップ数は $H-1$ 、 H 、 $H+1$ のいずれかとなる (図 3(a))。以降ではこれらをそれぞれ前向きノード、横向きノード、後向きノード、それぞれへの転送を前向き転送、横向き転送、後向き転送と呼ぶこととする。例えば、図 3(a) に示すノード C において、前向きノードはノード B 、横向きノードはノード D 、後向きノードはノード E である。各ノードは構成情報テーブルを参照しながら、受信した ID に対して SREQ を送信するかどうかを判定することが、ルーティング方法の基本となる。図 3(a) のようなネットワークを想定する。図 3(a) において $A \sim E$ はノードであり、ノード間を接続する実線が無線回線である。各ノードは自分と隣接するノードの構成情報を保持している。例えば、ノード C が保持している構成情報テーブルは図 3(b) のとおりである。

パケットの送信先としては、最小ホップで転送を終えるために前向きノードが優先される。パケット送信時に前向きノードからの ID を受信した場合にはそのまま SREQ を返信し、横向き転送は全ての前向きノードとの通信が失敗した時に行う。以下では、現状のルーティング手法 R1 を定義する。

ルーティング手法 R1

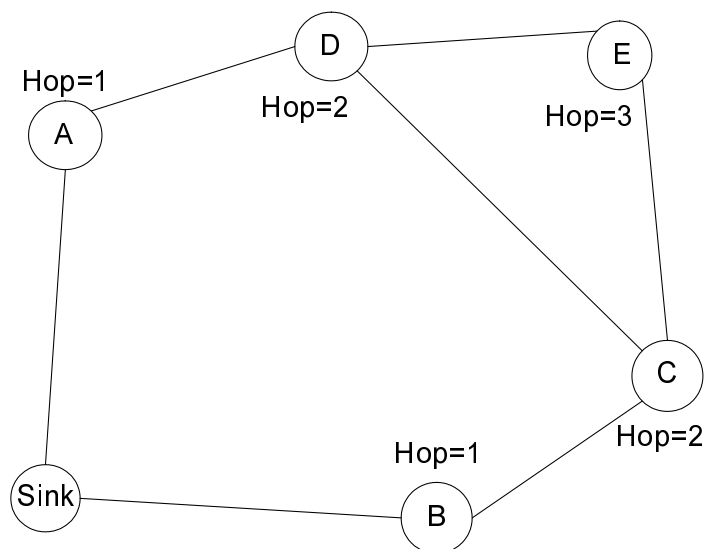
1. まず前向き送信先の候補から ID を待ち受け、データ送信を試みる。
2. 全ての前向き送信先ノードへの送信に失敗した場合は、前向きには 100%の確率で、横向きには 50%の確率で送信する。

すなわちルーティング手法 R1 では、あるノードの前向きノードが 3 個あったとすると、その 3 個のノードから ID を受信しデータ送信を試みる。その間に横向きノードから ID を受信してもデータ送信しないが、全ての前向きノードに対して少なくとも 1 度データ送信失敗したら、横向きノードから ID を受信しデータを送信するかどうかを 50%の確率で決定する。

また、データの中継回数にはあらかじめ上限を与えており、この最大中継回数を超えない限りは横向き/後向き転送を行う。ただし、横向き/後向き転送を行うとシンクノードまで到達できないような場合には SREQ を返信しない。以上により、IRDT 方式は柔軟かつ信頼性の高いルーティング方法を実現している。

2.3 現状の IRDT 方式における問題点

現状の IRDT 方式は低頻度でデータが発生するネットワークに対して、平均的な消費電力を抑制できることが明らかになっている [7]。しかし、実際に各ノードの電力消費状況を



(a) ネットワーク構成

Bの構成情報	A	B	C	D	E	Sink
	3	-	1	2	2	1

Cの構成情報	A	B	C	D	E	Sink
	2	1	-	1	1	2

Dの構成情報	A	B	C	D	E	Sink
	1	2	1	-	1	2

Eの構成情報	A	B	C	D	E	Sink
	2	2	1	1	-	3

(b) ノード C が保持する構成情報テーブル

図 3: ネットワーク構成情報の例

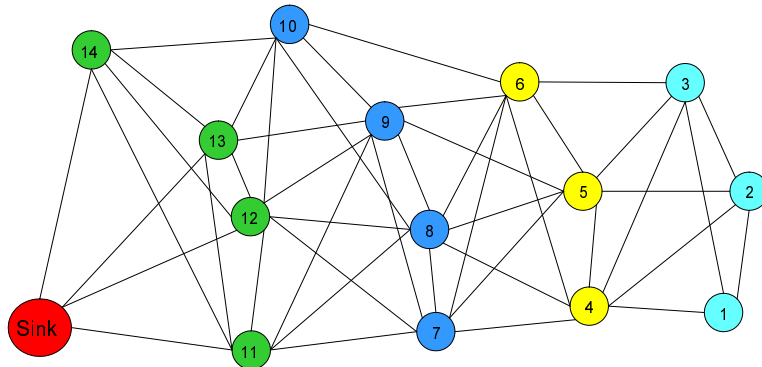


図 4: シミュレーションに使用したネットワークモデルのトポロジー。各ノードで発生したデータパケットがマルチホップでシンクノードに伝送される。ノードの色は、シンクノードからのホップ数を表している。

分析してみると、大きくばらつきが生じることが確認された。例えば、図 4 のようなトポロジーを持つネットワークに IRDT 方式を適用したシミュレーション結果を図 5 に示す。ここでは、ネットワークを構成するノードの内、あるノードの電力が枯渇して停止した時点ネットワーク寿命とする。図ではノード 12 の電力枯渇によりネットワークが停止しているが、ネットワーク内の電力総量の 5 割程度の残余電力があることが確認できる。

各ノードにおける電力消費のばらつきの原因は、トポロジーによってノードごとの負荷に大きな差があるためである。このような状況では、電力消費率が最も大きなノードから残余電力が枯渇しはじめ、やがてそのノードの残余電力が 0 になると動作が停止することになる。

ネットワーク寿命をできるだけ延ばすためには、消費電力が最も大きなノードの消費電力を抑制することが必要である。そのためには、ノード間での消費電力の差異を抑制し平均化することが望ましい。また残余電力が平均化できれば、電池交換をまとめて行なうことができ、作業効率の点からも望ましい。次章では、このような考えに基づき、残余電力量に応じて間欠周期を制御し、消費電力の平均化を実現するための方式を提案する。

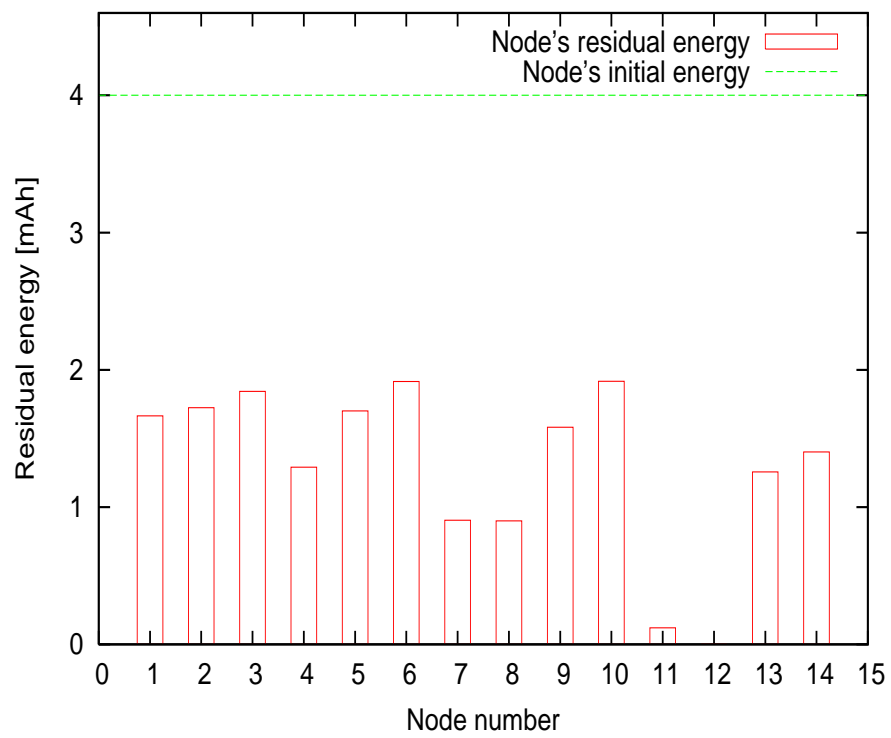


図 5: 各ノードの残余電力の状況 (ノード 12 の電力が枯渇した時点での残余電力)

3 自己の残余電力情報を活用した制御によるネットワークの長寿命化

3.1 自己の残余電力に基づく間欠周期制御

ここでは、ネットワークを構成する各ノードは自分の残余電力状況を常に監視し、減少割合に応じて、間欠周期を制御し、スリープ時間を延長することによって電力消費量を抑制する方式を提案する。すなわち、残余電力が少ないノードほど、間欠動作の周期を長くしてスリープ時間を延長することにより、他ノードからデータを受信する確率を抑制し、結果として電力消費を抑制できる。そのために、各ノードは以下の式 (1) に従って自分の間欠動作の周期である $T(t)$ を制御する。

$$T(t+1) \leftarrow T_0 * \frac{E_{max}}{E(t)} \quad (1)$$

ここでは、 T_0 は間欠周期の初期値、 E_{max} は初期電力量、 $E(t)$ は時刻 t における残余電力とする。

この方式によって、例えば残余電力が 50% になれば、スリープ時間である間欠周期は 2 倍となり、パケットを中継する確率がほぼ半減するので電力消費率を抑制することができると考えられる。ただし、これはパケットを中継する処理に要する電力であり、自分の発生したデータの送信処理に対する電力消費率には影響しない。従来のシステムではトポロジーの特徴から最も負荷が高いノードの電力消費率が最も高くなり、やがてそのノードの電力が枯渇する。従って、上述の方式をシステムに適用することにより、負荷が最も高いノードの電力消費率を抑制することでネットワークの長寿命化を図る。

上述の方式をシミュレーションによって評価した。ここで、対象としたネットワークのトポロジーは図 6 に示した 14 個のノードで構成されるものを用いた。また、主なパラメータを表 1 にそれぞれ示す。また、ルーティングは 3 章で示した R1 を適用した。

間欠周期を $T_0=0.3$ s に固定した場合と、式 (1) によって制御した場合について、時間経過に対する各ノードの残余電力の変化を図 7(a)、7(b) に示す。間欠周期の初期値および固定の場合の値である T_0 として 0.3 s を用いたのは、ネットワーク寿命が最も延びるのがシミュレーションにより明らかになったためである。

間欠周期を固定した場合、各ノードの残余電力が時間に対してほぼ線形に減少していくのに対して、間欠周期を式 (1) によって制御した場合、残余電力の減少に伴って、各ノードの残余電力の減少の傾きが緩やかになっていることが確認できる。図 7(a) では最も減少が早いのはノード 11 と 12 であるが、図 7(b) では最も減少が早いのはノード 7 と 8 であり次にノード 11 と 12 である。これは、式 (1) によって制御することにより、負荷が最も高いノード 11 と 12 は早い段階に自分の間欠周期を長くして電力消費を抑制するので、その上流にあ

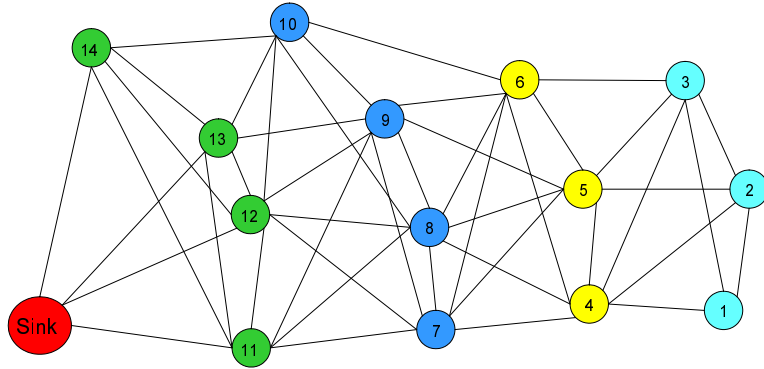


図 6: トポロジー

表 1: シミュレーションパラメーター

パラメーター	値
センサノード数	14
シンク数	1
リンク確立距離	100 m
ノード当たりのデータ発生率	0.01 packet/s
初期電力量	4 mAh
間欠周期	0.3 s
送信時消費電流	20 mA
受信待ち時消費電流	25 mA
受信時消費電流	25 mA
スリープ時消費電流	0 mA
通信速度	100 kbps
データサイズ	128 byte

るノード7と8の送信待ち時間と横向き転送回数が増加することに原因がある。提案方式を適用することにより、結果としてネットワーク全体の寿命が延びていることが確認できる。

次に、各ノードでのパケット発生率に対する基本特性であるネットワーク寿命、パケット収集率、遅延時間、最初にあるノードの電力が枯渇し、ネットワークが停止する直前の1000秒間のパケット収集率を図8(a)、8(b)、9(a)、9(b)に示す。パケット発生率に対して、ネットワーク寿命は大きく変動するが、パケット収集率と遅延時間はほとんど変動がない。

3.2 ルーティング方法の改良

3.1節で提案した自己の残余電力に応じて間欠周期を制御する方式によってネットワーク寿命が伸びることがシミュレーションによって明らかになった。提案方式によって、負荷が最も高いノード11と12の電力消費率を抑制できたが、ノード7と8の電力消費率がある時点から急激に増大し、これらのノードの電力が枯渇することで、ネットワークの寿命が決定している。

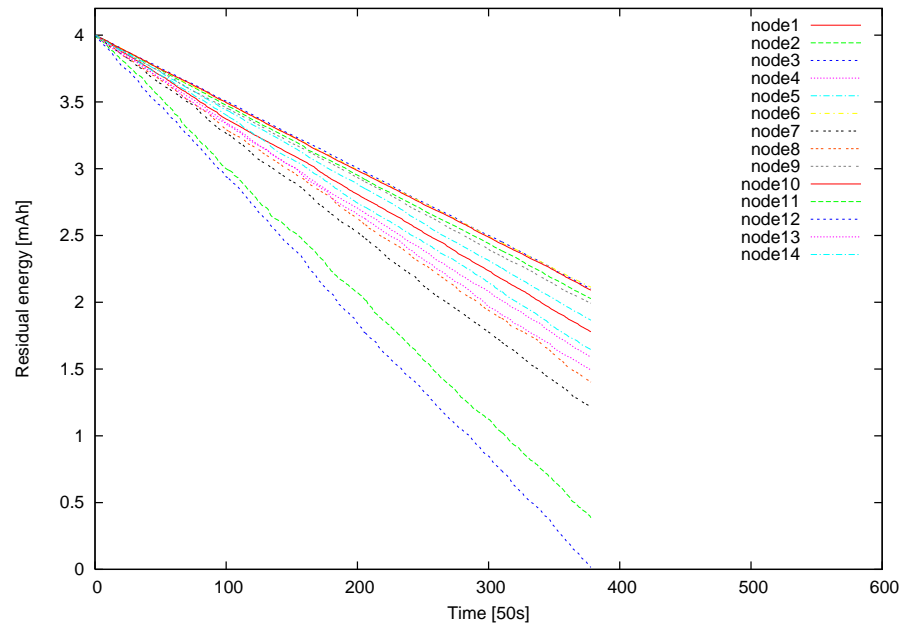
この原因として、ノード7と8における前向きノードであるノード11と12の間欠周期が長くなったことが考えられる。現状のルーティング手法R1では、全ての前向きノードからのIDを待ち受け、それに失敗した時点から横向きからのIDも50%の確率で待ち受けることができるようになる。しかし、前向きノードの残余電力が減少し、間欠周期が長くなると、前向きノードからIDが届くまでの、待ち時間が増大するため急激に電力消費率が大きくなってしまう。

このような待ち時間を削減するためには、横向きノードへの転送を積極的に行なうことにより、残余電力が大きく間欠周期の短いノードへの転送機会を増やすことが有効であると考えられる。そこで、横向き転送を積極的に導入するようなルーティング方法R2を定義する。

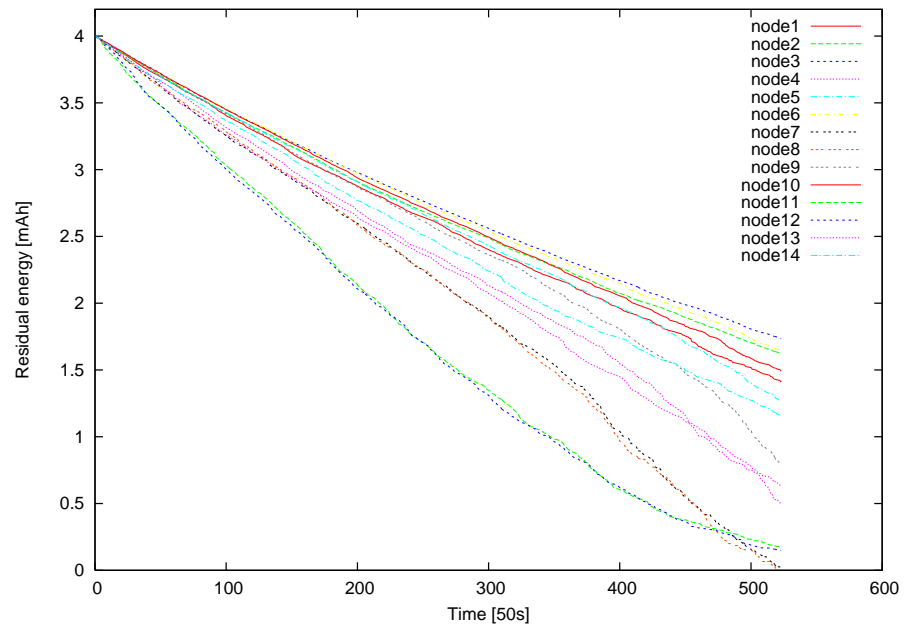
ルーティング手法 R2

1. 送信すべきデータを保持したノードは、ID待ち状態になる。
2. IDを受信した場合には、そのIDが前向きでも横向きでも100%の確率でデータ送信する。

このルーティング手法は前向きか横向きは問わず、最初にIDを受信したノードに対してデータ送信を行なうことで、データ保持時間の削減を図る。間欠周期が固定の場合と式(1)によって制御される場合、またルーティング手法がR1の場合とR2の場合の合計4通りについて、平均ネットワーク寿命のシミュレーション結果を表2に示す。シミュレーション結

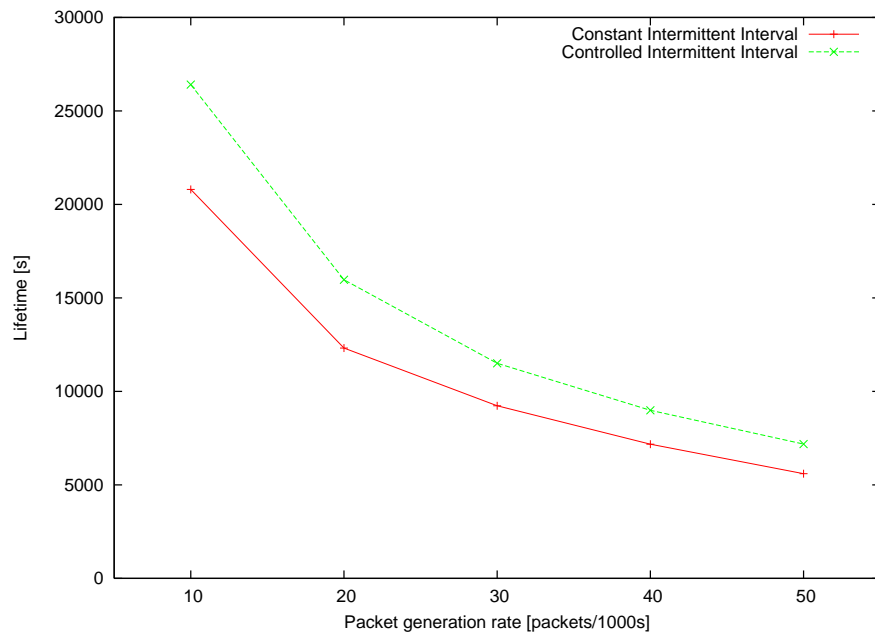


(a) 間欠周期を 0.3 s に固定した場合

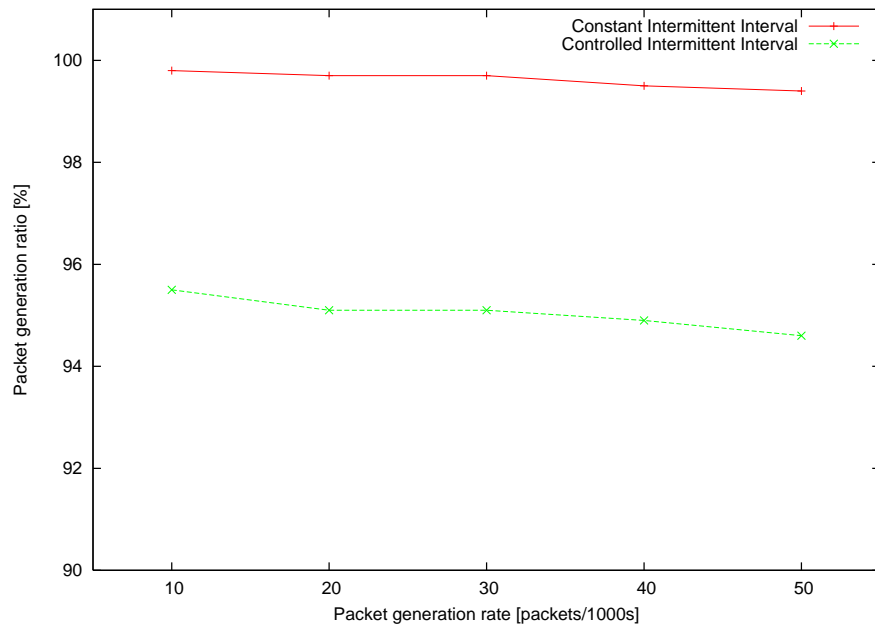


(b) 自己の残余電力に基づいて間欠周期を制御した場合

図 7: 時間経過に対する各ノードの残余電力の変化

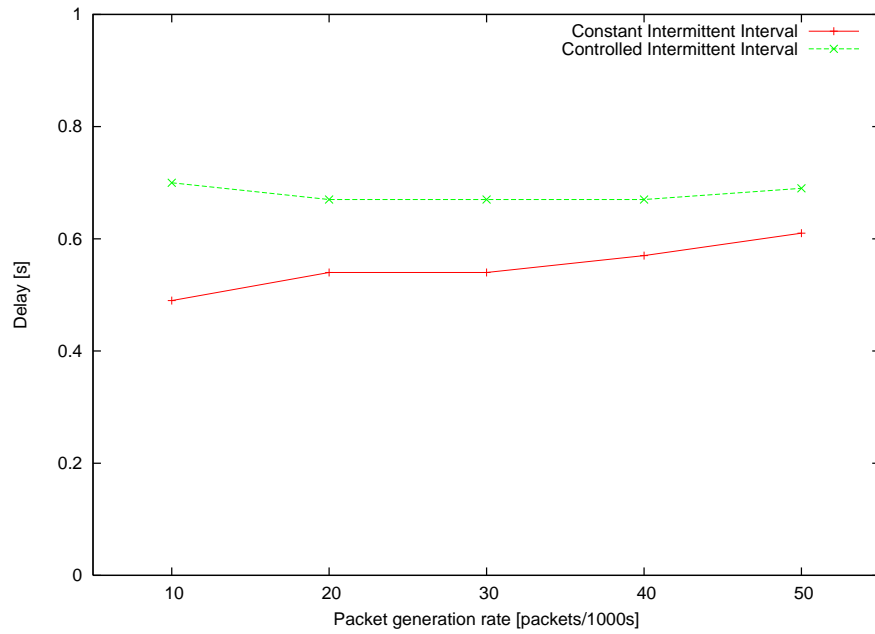


(a) ネットワーク寿命の変化

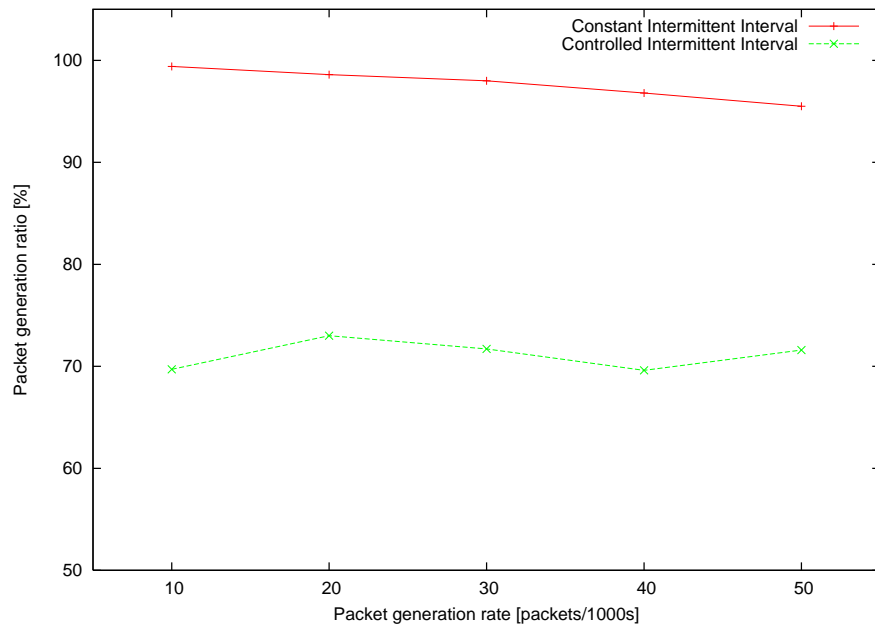


(b) パケット収集率の変化

図 8: パケット発生率に対する基本性能



(a) 遅延時間の変化



(b) 最後の 1000 秒間における収集率の変化

図 9: パケット発生率に対する基本性能

表 2: ルーティング手法 R1 と R2 の比較

	R1	R2
間欠周期を 0.3 s に固定した場合	19120 s	20724 s
間欠周期を式 (1) によって制御した場合	26426 s	27845 s

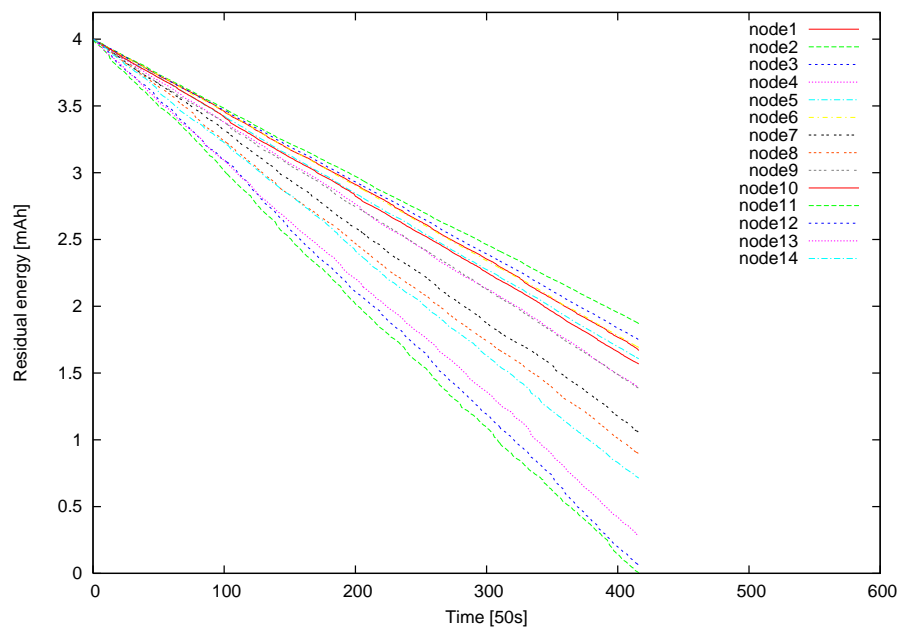
果から R2 を適用した方がネットワーク寿命が伸びることが確認された。すなわち、横向き送信を積極的に利用し、前向き送信のための待ち時間を減少させることで、消費電力が抑制できることが明らかになった。

また、R2 のルーティング方法を適用した時の各ノードにおける時間経過に対する残余電力の変化を図 10(a)、10(b) に示す。ホップ数 1 のノードであるノード 11・12・13・14 に着目していると、図 7(a)、7(b) により差は縮まる傾向にあるのが確認できる。つまり、R2 の導入にとりある程度の負荷分散が実現できたことになる。

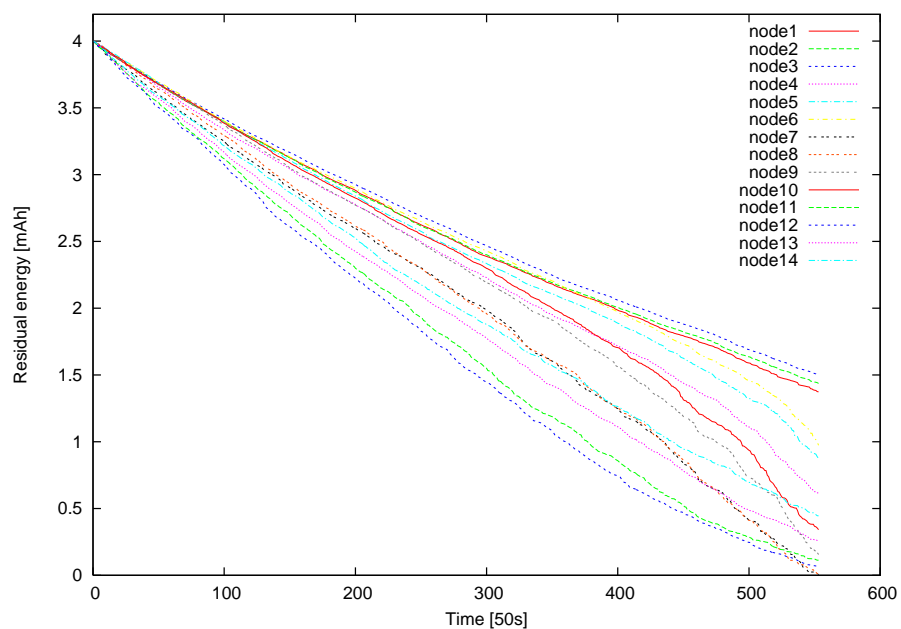
3.3 ネットワークの性能低下問題

ここまでは、自分自身の残余電力に関する情報を活用しネットワーク寿命を延ばす手法を提案し、その有効性を検証した。まずは、自己の残余電力に基づいて間欠周期を制御する手法を対象システムに適用し、さらに積極的に横向きノードに送信するルーティング手法を導入し、間欠周期の初期値を最適化した結果、ネットワーク寿命を 36% 延ばすことができた。本章での提案手法と従来手法との基本性能比較を表 3、4 に示す。

しかしながら、各ノードで発生したパケットの時間経過に対する収集率を調べたところ、ネットワーク寿命が近づくと急に収集率が低下していることが明らかとなった (図 11)。提案方式においては、ネットワークを構成する各ノードが、自己の残余電力のみに基づいて間欠周期を制御している。したがって、時間の経過とともに、残余電力が少なくなるのに伴って、ネットワーク全体として間欠周期が大きくなっている。その結果、ネットワーク寿命に近づくと、間欠周期が大きくなりすぎてしまい、パケットをシンクノードまで送ることができなくなってしまっている。ネットワーク寿命が延びたとしても、性能が劣化してしまうことは問題であるため、ノードが単純に間欠周期を増やすだけではなく、周囲のノードから何らかの情報を得て、相対的に制御することが必要であると考えられる。



(a) 間欠周期を 0.3 s に固定した場合



(b) 自己の残余電力に基づいて間欠周期を制御した場合

図 10: ルーティング R2 による残余電力の変化

表 3: 間欠周期を 0.3 s に固定した場合のネットワーク性能

ネットワーク寿命	平均遅延時間	パケット収集率	最後 1000 秒間の収集率
20724 s	0.50 s	99.8 %	99.3 %

表 4: 間欠周期を残余電力に応じて制御した場合のネットワーク性能

ネットワーク寿命	平均遅延時間	パケット収集率	最後 1000 秒間の収集率
27845 s	0.79 s	96.2 %	57.5 %

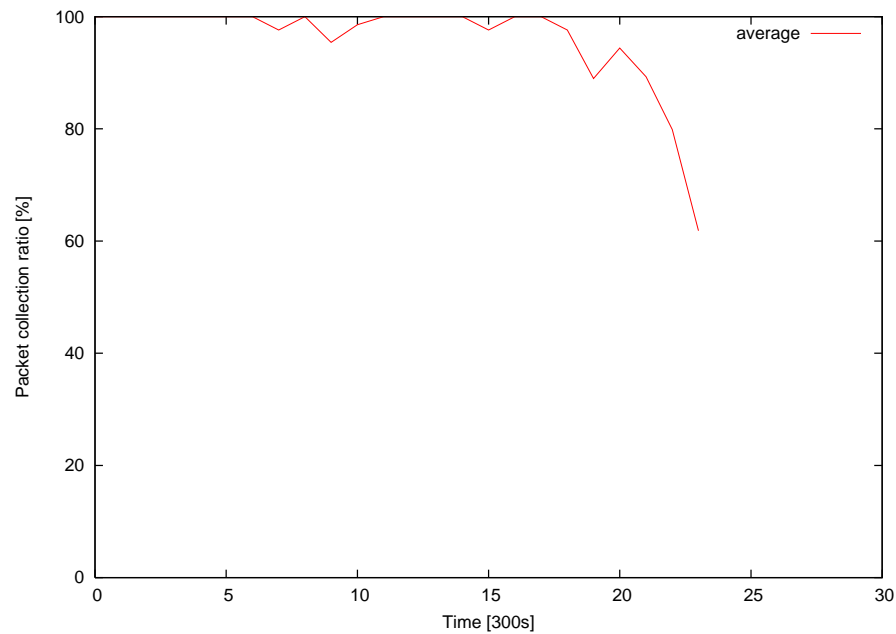


図 11: 300 秒ごとの区間内平均パケット収集率

4 周囲ノードの残余電力に関する情報を活用した制御

ここまでは、自分自身の残余電力に関する情報を活用した制御により、ネットワーク寿命を延ばすことに取り組んだ。しかし今までの手法では、単純に自分自身の残余電力の減少に応じて間欠周期を長くしていくので、ネットワーク全体の残余電力に応じて、ほとんどのノードが間欠周期を長くしてしまい、結果としてネットワーク全体の性能が劣化することが確認された。ネットワーク全体の性能を維持するためには、各ノードの残余電力の相対的な関係に応じて制御を行なう必要があると考えられる。IRDT 方式においては、各ノードが間欠的に送信する ID パケットに自己の残余電力情報を付加することにより、隣接ノードの残余電力状況を知ることが可能となる。この章では、周囲ノードの残余電力情報を活用し、ネットワーク全体の性能を維持しながらネットワーク寿命を延ばす手法を提案し、その有効性を検証する。

4.1 残余電力情報の交換と管理

IRDT 方式において各ノードは間欠的に ID パケットを送信するので、そこに自己の残余電力情報を付加することで、周辺ノードに自己の残余電力を通知することができる。各ノードは、受け取った残余電力を、各ノードが管理する構成情報テーブルに格納する。また、ID パケットを受信するたびに、保持する残余電力情報を更新する。また、ID を受信するたびに、送信ノードに関する残余電力情報を更新するような仕組みを導入する。これらは、既存の IRDT に対してわずかな変更で実現できるものである。

4.2 残余電力情報を活用したルーティング手法

IRDT 方式では、電力を消費する待ち時間の大半がデータ送信時に生じるものであり、これを削減するためには ID パケットの待ち時間を削減することが必要である。一方、パケットを最短経路でシンクノードに送信するためには、できるだけ前向きノードに対して送信することが望ましい。しかしながら、前向きノードへの送信が集中すると、それらの残余電力が小さくなり、結果として間欠周期が長くなることによって、ID 待ち時間が増大してしまう。逆に、ID 待ち時間を削減するために横向きにばかり送信していると、1 パケット当たりの消費電力が増大してしまう。従って、前向き・横向きそれぞれに対する送信確率を、周辺ノードの残余電力状況に応じて適応的に設定することにより、待ち時間や消費電力を削減できると考えられる。

そこで、新たに周囲ノードの残余電力状況を活用したルーティング手法を提案する。基本的な考え方は、送信すべきデータを保持するノードは全ての前向きノードの残余電力情報

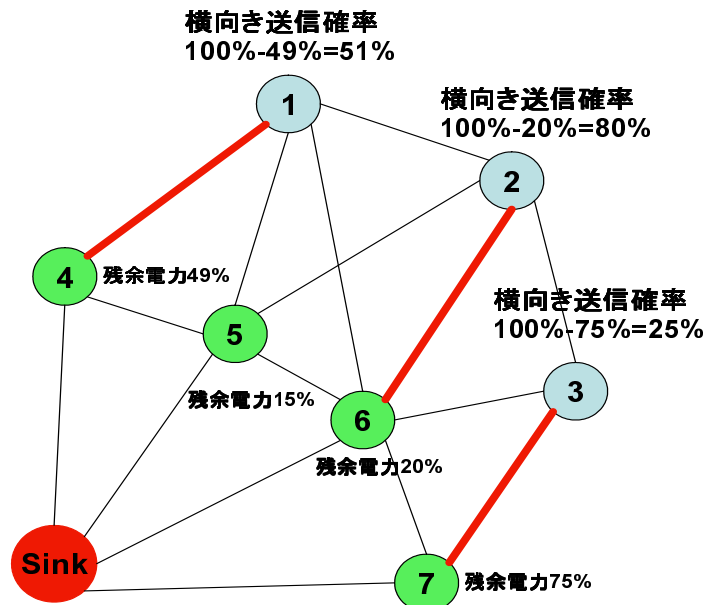


図 12: 前向きノードの残余電力の状況を考慮したルーティング手法 R3

を参照し、残余電力が大きいノードがあればそのノードからの ID を待ち、そうでなければ積極的に横向き送信を活用して、ID 待ち時間による電力消費を抑制する。例えば、図 12 のノード 2 が送信データを保持している場合、まず前向きノード 5・6 の残余電力情報を参照し、どちらも少なくなっているのを確認したら横向きノードへの送信確率を大きくする。ノード 3 が送信データを保持している場合は、前向きノード 6・7 の残余電力情報を参照し、ノード 7 の残余電力が大きいことを確認した場合は、横向きノードへの送信確率を下げることで、より前向きへ送るようにする。このように残余電力情報を活用した制御により、待ち時間による消費電力の削減が可能になり、結果的にネットワークの長寿命化が期待できる。以上を踏まえて、送信先ノードの残余電力情報を考慮した新しいルーティング手法として R3 を定義する。

ルーティング手法 R3

1. 前向きノードから ID を受信したら 100% の確率で SREQ を送信する。
2. 横向きノードから ID を受信したら、 $(100\% - X\%)$ の確率で SREQ を送信する。X は全ての前向きノードのうち残余電力の最大比率である。

表 5: ルーティング手法 R3 を適用した後のシミュレーション結果

ネットワーク寿命	平均遅延時間	パケット収集率	最後 1000 秒間の収集率
27986 s	0.78 s	96.2%	58.1%

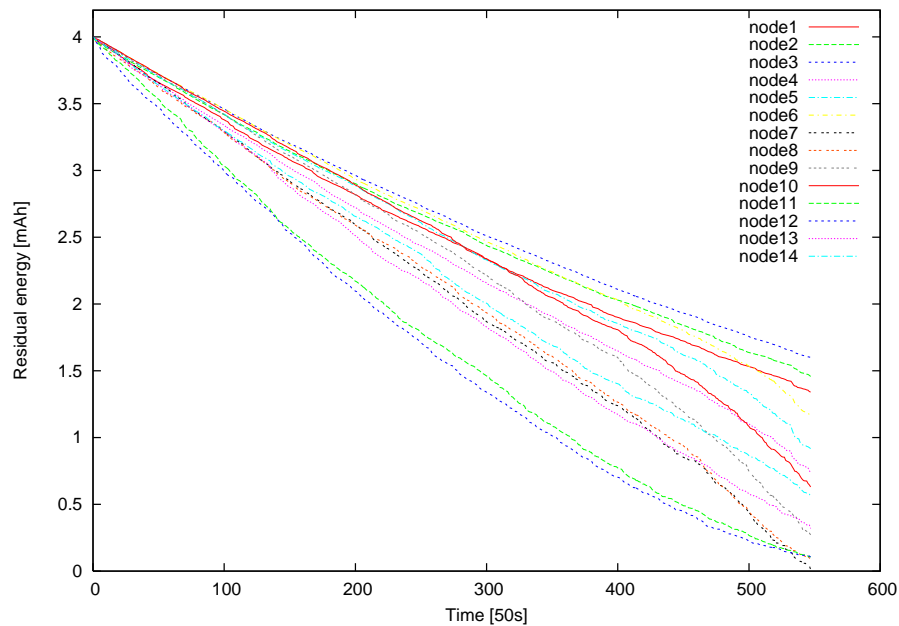


図 13: R3 を適用した時の残余電力の変化

このルーティング手法 R3 をシステムに適用し、シミュレーションを行った結果を表 5 に示す。前章の結果である表 4 に比べると、ネットワーク寿命は若干伸びることがわかった。

4.3 残余電力情報に基づいた間欠周期の制御方式

3 章で明らかになったように、各ノードが単純に自己の残余電力に応じて間欠周期を大きくしていくと、負荷の集中するノードの間欠周期が大きくなっていき、ネットワーク性能が劣化してしまう。これを防ぐためには、単に自己の残余電力だけではなく、周辺ノードの残余電力との相対的な関係によって間欠周期を増減させることにより、適切な負荷分散を行なう手法が必要である。

そこで、各ノードは周囲ノードの残余電力情報を活用し、相対的に間欠周期を制御することにより、負荷分散を実現する手法を提案する。以下の式 (3) の条件を満たしながら、式 (2)

によって自分の間欠周期を決定することで間欠周期を制御する。

$$T(t+1) \leftarrow T(t) * (1 + A * (Y(t) - E(t))) \quad (2)$$

$$T(t) \leq T_{max} \quad (3)$$

ここでは、 $T(t)$ は時刻 t での間欠周期、 $E(t)$ は現在の残余電力、 $Y(t)$ は全ての横向きノードの残余電力の平均値、 T_{max} は間欠周期の上限値、 A は定数である。

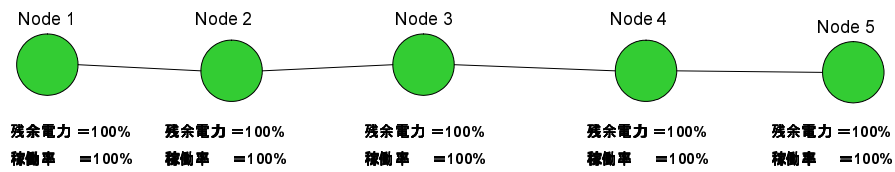
この方式の目的は、ホップ数が同じノード間の負荷を分散させることにより、ネットワーク寿命を延長することである。図 14(a) ではホップ数が同じノード群を示す。最初は、これらのノードの残余電力間に差異はないが、ネットワーク動作を開始するとそれぞれの負荷が異なるので図 14(b) のように残余電力に差異が生じる。ノード 3 の残余電力が隣接しているノード 2 およびノード 4 に比べ減少しているため、式 (2) によって、ノード 3 の間欠周期を長くし、隣接しているノード 2 およびノード 4 の間欠周期を短くする (図 14(c))。このように残余電力の差に応じて間欠周期を調整し、スリープ時間とアクティブ時間の比率を適切に制御することで、ネットワークの性能を維持しながらノード間で負荷分散を行い、ネットワーク寿命を延長することが期待できる。

式 (2) の定数 A は、残余電力の差が間欠周期に与える影響を定めるもので、シミュレーションの結果、 $A=2 \text{ [mAh}^{-1}\text{]}$ の時にネットワーク寿命が最も伸びている。

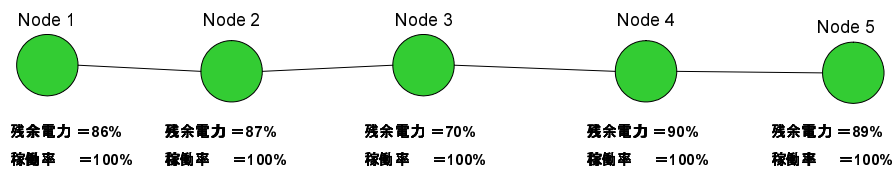
また、式 (2) による間欠周期の制御だけでは、ネットワーク全体の残余電力が減少してきたときに、間欠周期が長くなりすぎる欠点がある。IRDT 方式においては、送信ノードが ID パケットを待つ最大時間よりも間欠周期が大きくなると、送信失敗する確率は増加する (図 16)。従って、間欠周期の上限値を式 (3) によって設定する。ただし、本研究においては、シミュレーション環境上では ID 待ち時間の最大値が 1.5 s に定められているので、 $T_{max} = 1.5 \text{ s}$ になる。

表 6: 間欠周期の最大値 $T_{max} = 1.5 \text{ s}$ に設定した時のシミュレーション結果

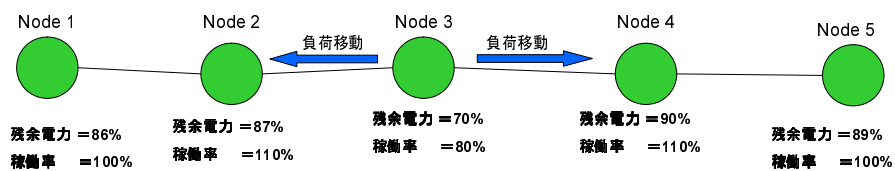
ネットワーク寿命	平均遅延時間	パケット収集率	最後 1000 秒間の収集率
29266 s	0.57 s	99.7 %	99.5 %



(a) 初期の状態



(b) 残余電力差が生じた状態



(c) 残余電力差に基づいて負荷分散

図 14: 間欠周期の制御による負荷分散

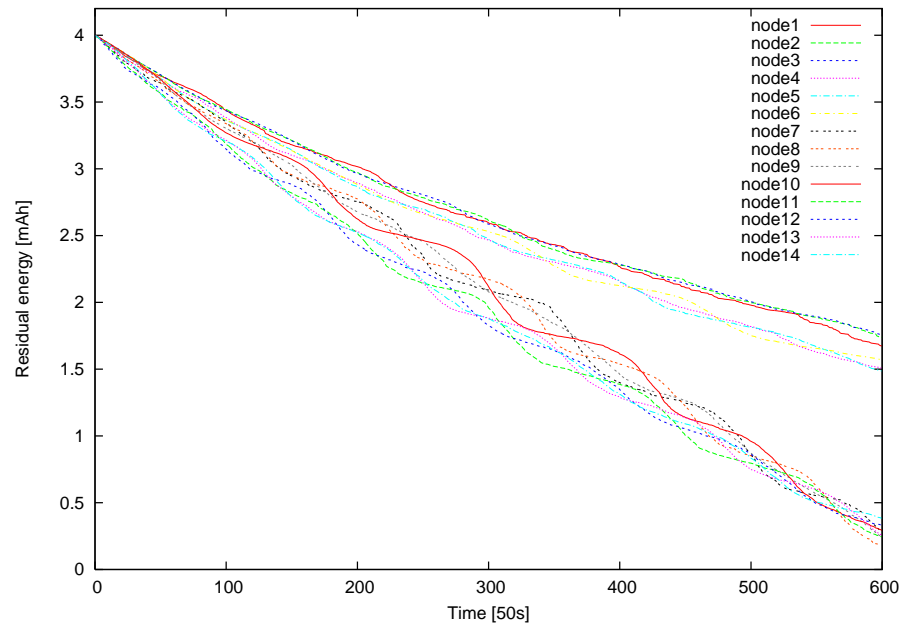


図 15: 周囲ノードの残余電力情報に基づいて、間欠周期を制御した時の残余電力の変化

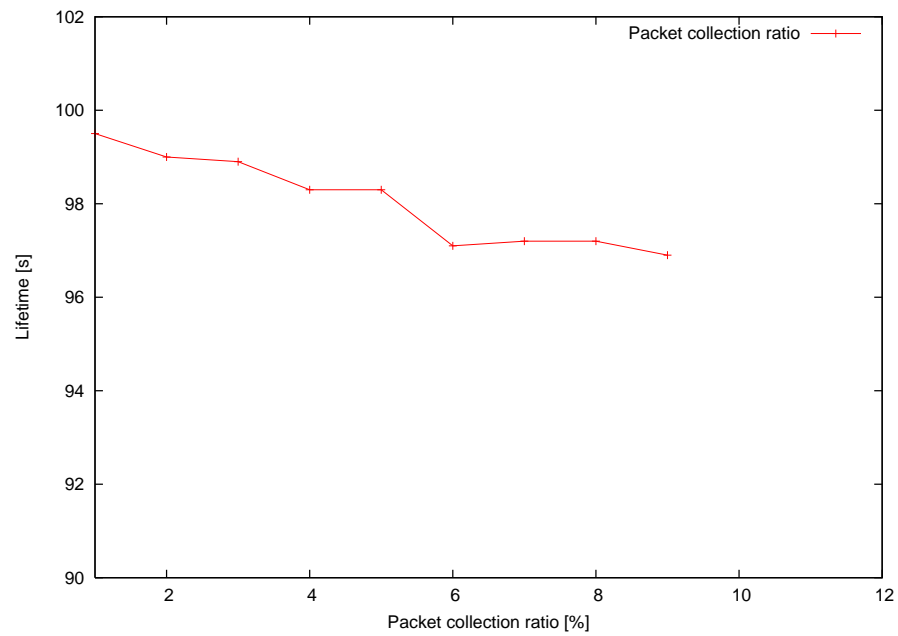


図 16: T_{max} に対するパケット収集率の変動

5 おわりに

本報告では、受信端末始動型の間欠動作を行なう IRDT 方式による無線マルチホップネットワークを対象として、ネットワークを構成する各ノードの残余電力情報を活用することで、残余電力の平均化を行った。まず、各ノードが自己の残余電力情報のみを活用できる場合として、残余電力に応じて ID 送信間隔を制御することによって電力消費を抑制する方式を提案し、その評価を行った。その結果、ネットワーク寿命を 36% 延ばすことができたが、ネットワーク性能が低下する問題点が確認された。

次に、各ノードが周期的に送信する ID パケットに自己の残余電力情報を付加することによって、周囲ノードの残余電力の状況を取得することにより、残余電力の平均化を実現する制御方式を提案し、その評価を行った。シミュレーションによる評価の結果、ネットワーク性能を維持したままに、ネットワーク寿命を 44% 伸ばせることが明らかになった。

今後の課題は、上述の結果は最適な結果かどうかを解析的に検討することである。つまり、IRDT 方式において、ある一定の性能を維持しながら動作するようなネットワーク寿命の最大値を解析的に計算する必要がある。

謝辞

本報告を終えるにあたり、御指導、御教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深く感謝いたします。また、本報告において直接御指導いただきました大阪府立大学総合リハビリテーション学部の菅野正嗣教授には、様々な相談に乗っていただき、多くの助言をいただきました。心よりお礼申し上げます。また、平素から適切なご助言をいただいた大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授，大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教に深く感謝いたします。最後に日頃から本報告の作成にあたり様々な質問に答えて頂きました村田研究室の小南大智氏をはじめとする村田研究室の皆様方に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks,” in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1–10, Jan. 2000.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2002*, vol. 3, pp. 1567–1576, June 2002.
- [3] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 95–107, Nov. 2004.
- [4] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, “X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '06)*, pp. 307–320, Nov. 2006.
- [5] R. Jurdak, P. Baldi, and C. V. Lopes, “Adaptive low power listening for wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, pp. 988–1004, Aug. 2007.
- [6] 畠内孝明, 福山良和, 石井美里, 四蔵達之, “メッシュネットワークのためのポーリングによる低消費電力型アクセス方式の提案,” 電気学会論文誌 C, 電子・情報・システム部門誌, vol. 128, pp. 1761–1766, Dec. 2008.
- [7] 小南大智, 菅野正嗣, 村田正幸, 畠内孝明, 福山良和, 四蔵達之, “受信端末始動型間欠動作データ転送方式の性能評価,” 電子情報通信学会 技術研究報告 (IN2008-155), pp. 139–144, Mar. 2009.
- [8] O. Younis and S. Fahmy, “HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, pp. 366–379, Oct. 2004.

- [9] N. Israr and I. Awan, “Coverage based inter cluster communication for load balancing in heterogeneous wireless sensor networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 38, pp. 121–132, Apr. 2008.
- [10] S. Lee, J. Lee, H. Sin, S. Yoo, S. Lee, J. Lee, Y. Lee, and S. Kim, “An energy-efficient distributed unequal clustering protocol for wireless sensor networks,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 48, pp. 443–447, 2008.
- [11] J.-H. Chang and L. Tassiulas, “Maximum lifetime routing in wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, pp. 609–619, Aug. 2004.
- [12] R. C. Shah and J. M. Rabaey, “Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks,” in *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 350–355, Mar. 2002.
- [13] Y. Chen and Q. Zhao, “Maximizing the lifetime of sensor network using local information on channel state and residual energy,” in *Proceedings of the 2005 Conference on Information Science and Systems*, Mar. 2005.
- [14] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [15] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Fukuyama, “Performance evaluation of intermittent receiver-driven data transmission on wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2009)*, pp. 141–145, Sept. 2009.
- [16] T. van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03)*, pp. 171–180, Nov. 2003.
- [17] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagöz, “MAC protocols for wireless sensor networks: a survey,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, pp. 115–121, Apr. 2006.
- [18] K. Langendoen and G. Halkes, “Energy-efficient medium access control,” in *Embedded Systems Handbook* (R. Zurawski, ed.), pp. 256–287, CRC Press, Aug. 2005.
- [19] 小南大智, 菅野正嗣, 村田正幸, 畠内孝明, 町田潤一, “受信端末始動型マルチホップ無線ネットワークにおける制御パケットの衝突を考慮した性能改善,” 電子情報通信学会 技術研究報告 (AN2009-32), pp. 65–70, Oct. 2009.