

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 長寿命化のための間欠周期制御手法の検討

Damdinsuren Chuluunsuren[†] 小南 大智[†] 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†] 畠内 孝明^{†††}

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 564-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪府立大学総合リハビリテーション学部 〒 583-8555 大阪府羽曳野市はびきの 3-7-30

^{†††} 富士電機システムズ 〒 191-8502 東京都日野市富士町 1

E-mail: [†]{c-damdin,d-kominami,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp,

^{†††}hatauchi-takaaki@fesys.co.jp

あらまし マルチホップ無線ネットワークにおいて、ノードを間欠的に動作させることによって消費電力を抑制するためには、間欠周期を適切に設定することが重要である。本稿では、受信端末駆動型のマルチホップ無線ネットワークにおいて、ノードの残余電力に応じて間欠周期を制御する手法を提案し、その設定値を解析的に導出する手法を検討した。シミュレーションによる評価の結果、ネットワーク寿命を約 75% 延ばせることが明らかになった。

キーワード センサネットワーク, 残余電力, 負荷分散, 長寿命化, 解析

Control Method of Intermittent Interval for Extending Lifetime of Receiver-driven Multi-hop Wireless Network

Chuluunsuren DAMDINSUREN[†], Daichi KOMINAMI[†], Masashi SUGANO^{††},

Masayuki MURATA[†], and Takaaki HATAUCHI^{†††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

^{††} School of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture University
3-7-30 Habikino, Habikino-shi, Osaka, 583-8555, Japan

^{†††} Fuji Electric Systems 1, Fujicho, Hino-shi, Tokyo, 191-8502, Japan

E-mail: [†]{c-damdin,d-kominami,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp,

^{†††}hatauchi-takaaki@fesys.co.jp

Abstract In the multihop wireless networks, it is important to set an intermittent interval appropriately to control power consumption when nodes operate intermittently. In this paper, we propose the technique for controlling the intermittent interval according to the residual energy. And we discuss about the method for deriving the best value of the intermittent interval by analyzing method.

Key words Sensor network, Residual energy, Load balancing, Lifetime extension, Analysis

1. はじめに

センサネットワークは、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に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、半導体技術の高度化や充電機器の追加、間欠動作による省電力化、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 [1]。その中でも特に、間欠動作による消費電力の低減化が有効であることから、間欠動作に基づいたさまざまな方式が提案されている。間欠動作とは、ノードがアクティブ状態とスリープ状態を繰り返すことで消費電力を抑制することで

ある．非通信時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，通信時には起動タイミングをノード間で制御する必要がある．間欠動作は，その制御方式によって同期式 [2, 3] と非同期式 [4-7] に分類できる．また，通信開始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 [4, 5] と受信端末駆動型 [6, 7] の方式に分類される．

本稿では，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間欠動作通信方式である IRDT (Intermittent Receiver-driven Data Transmission) 方式 [7] が消費電力の観点から適していることが明らかにされている [8]．これによりネットワーク全体の平均消費電力を抑制することはできるが，ノードごとの消費電力の差異は依然として存在する．そのため，負荷が最も大きいノードの電力が最も早く枯渇することによって，ネットワークの一部が停止してしまう．このような問題を解決するためには，実際の残余電力情報に基づいた負荷分散により，ネットワークを長寿命化することが必要である．残余電力情報に基づいた負荷分散に関する研究としては，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クラスタリング方式 [9] や，消費電力コスト・残余電力情報などに基づいてシンクまでの経路を計算し，最も適切な経路を選択するルーティング方式 [10] がある．しかしながら，残余電力情報を活用した間欠周期の制御手法に関する研究は十分なされていない．

そこで本稿では，残余電力情報を活用した間欠周期の制御を行うことで，ネットワークを長寿命化する手法を提案する．提案手法は，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．提案手法では，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って残余電力情報の交換を実現する．間欠周期を変えると，データを中継する数が変わるので，消費電力を制御することが可能になる．各ノードは，周辺ノードと自己の残余電力に基づき，間欠周期の制御を行なうことを目的とする．これによって消費電力の偏りを抑制し，ネットワーク全体の稼働時間を延ばすことを目指す．

本稿は，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，残余電力に関する情報を活用した提案手法について，4 章ではシミュレーションによる提案手法の評価について述べる．最後に，5 章に本報告のまとめと今後の課題を述べる．

2. 受信端末駆動型通信方式 IRDT の概要

2.1 MAC 層プロトコル

IRDT 方式において，ノードは受信待機状態にある場合，図 1 のように間欠的に自身の ID を送信する．ID 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．一方で，ノードは送信すべきデータを保持している状態にある場合，隣接ノードから ID を受信するまで待機し，適切な送信先ノードの ID を受信すれば，データ送信要求 (SREQ) を返

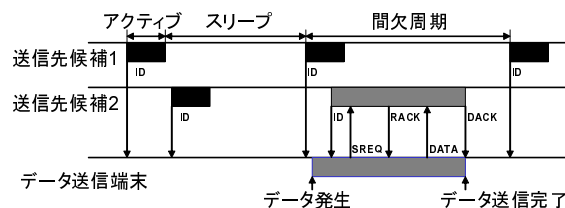


図 1 IRDT 方式におけるデータ通信手順

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 1 では，送信ノードが ID 待ち状態になり，最初に送信先候補 2 から ID を獲得し，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 ネットワーク層プロトコル

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．IRDT 方式では，最小ホップ経路と迂回経路を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，最新の構成情報を保持している．構成情報テーブルとは自分からそれぞれのノードまでの経由するノード数のデータベースである．以降では，経由するノード数をホップ数と呼ぶ．このテーブルからパケット宛先となるシンクノードまでのホップ数を求めることができる．あるノードにおいて，隣接するノードの中でシンクまでのホップ数が小さい・同じ・大きいノードをそれぞれ前向きノード・横向きノード・後向きノードとし，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 (図 2)．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．パケットの送信先としては，できるだけ中継回数を少なくするために，前向きノードが優先される．すなわち，ID 受信待機時に，前向きノードからの ID を受信した場合はただちに SREQ を返信し，全ての前向きノードとの通信が失敗した後に横向き転送を行う．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たパケットは破棄される．

2.3 既存の IRDT 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，平均消費電力を抑制できることが明らかにされている [8]．しかし，トポロジーによりノードごとの負荷に差が生じるため，ノード間に消費電力のばらつきが存在する．そのため，電力消費が最も大きなノードの残余電力が枯渇した時点で，ネットワークの一部が停止することとなる．特に，すべてのデータをシンクに収集する場合は，シンクの近辺のノードの消費電力が大きいいため，最初に電力が枯渇してしまう．このよ

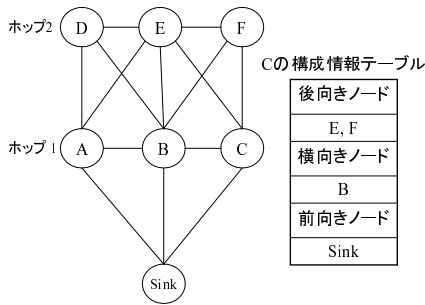


図 2 隣接ノード情報の管理

うなシンク近辺のノード停止は、ネットワーク全体に大きな影響を与える。本稿ではこのような考えに基づき、ネットワークを構成するノードのうち、あるノードの残余電力が枯渇して停止した時点ネットワーク寿命と定義する。ネットワーク寿命をできるだけ延ばすためには、ノード間で負荷分散することで消費電力を平均化することが望ましい。われわれはこのような考えに基づき、隣接するノードの残余電力に応じて間欠周期を制御する手法を提案した [11]。しかしながら、残余電力の状況によっては適切な間欠周期が得られない場合が存在したため、どのような場合でもより安定した制御を行なえる方式を提案する。

3. 残余電力情報を活用した負荷分散手法の提案

既存の IRDT 方式においては、各ノードは定期的に自己の ID を送信している。その ID に自己の残余電力情報を付加することで、周囲ノードに残余電力量を通知することができる。さらに、各ノードは ID を受信するたびに、情報テーブルに保持する周辺ノードの残余電力情報を更新する。このような残余電力情報の交換および管理の仕組みは、既存の IRDT 方式に対してわずかな変更で実現できるものである。

提案手法の基本的な考え方は、周囲ノードと自己の残余電力の相対的な関係により自己の間欠周期を制御することにより、負荷分散を実現することである。すなわち、各ノードは全ての横向きノードの残余電力の平均と自己残余電力との差に基づいて、自己の間欠周期を増減する。横向きノードと比較することによって、シンクからホップ数が同一のノード群の負荷を平均化し、電力消費の偏りを防止することが可能となる。各ノードは図 3 に示すアルゴリズムに従って、残余電力情報の交換を行ない、さらに 100 s ごとに自己の間欠周期を更新する。ここで、 $E[i]$ はノード i の残余電力、 $Es[i]$ はノード i における全ての横向きノードの平均残余電力、 $T[i]$ はノード i の間欠周期、 α は残余電力差が生じた時に間欠周期を増減させる量、 T_{max} は間欠周期の上限値、 T_{min} は間欠周期の下限値である。また、間欠周期が同期してしまうと、隣接ノード同士の起動するタイミングが重なることにより、いつまでもお互いの通信に衝突を起してしまうため、間欠周期を更新する時に、ランダムなノイズ値 $\delta (= [0.01, 0.08]s)$ を付加することにより、隣接ノード同士の同期による衝突を防いでいる。

```

// 残余電力情報の交換・管理
// 間欠周期ごとに残余電力情報を含むIDパケットを送信
if ( $T \geq T[i]$ ){
  ID = GenerateID( $i, E[i]$ );
  T = 0;
}
// IDを受信し隣接ノードの残余電力を格納する
// 横向きノードの残余電力の平均値を更新
if (Receive){
  table[ID.i] = ID.battery;
  E[i] = Average(ID.battery);
}
// 100sごとに間欠周期を更新
if ( $E[i] > Es[i]$ )
  { $T[i] = T[i] - \alpha + \delta$ ;}
else
  { $T[i] = T[i] + \alpha + \delta$ ;}
// 間欠周期の上下限値の条件確認
if ( $T[i] > T_{max}$ )
  { $T[i] = T_{max}$ ;}
if ( $T[i] < T_{min}$ )
  { $T[i] = T_{min}$ ;}

```

図 3 間欠周期の制御アルゴリズム

提案手法により、隣接する横向きノードの残余電力平均値よりも自己の残余電力が大きい場合は、間欠周期を短くすることによって、より多くのパケットを中継するようになる。逆に、自己の残余電力が小さい場合は、間欠周期を長くすることで、他のノードが先に受信することを期待する。このような制御を行なうことにより、それぞれのセンサノードは、互いに横向きノードの平均残余電力との差に応じて間欠周期を増減し、消費電力の偏りを抑制する。間欠周期が短いほど頻繁に中継動作を行なうため、遅延や上流のノードの消費電力は小さくなるが、ネットワーク全体の負荷を処理する以上に間欠動作を行なうことは無駄であるため、負荷に応じた下限値 T_{min} を設定する。また、間欠周期が長くなりすぎると、送信ノードでの ID 待ち時間切れによるパケット収集率の低下や、待ち時間増大に伴う消費電力の増加が発生するために間欠周期の上限値である T_{max} を設定する。

4. シミュレーション評価

計算機を用いたシミュレーションにより、提案手法の有効性を評価した。シミュレーションの対象ネットワークとして、図 4 に示すようなトポロジを持つネットワークを用いた。シンクノード 1 個に対して、センサーノード 14 個があり、定期的にデータをシンクへ送る。データの発生モデルは与えられた発生率に従い、ランダムに発生させる。シミュレーションを行う際に用いた主なパラメータの値を表 1 に示す。

4.1 基本性能の評価

図 5 は、既存の IRDT と提案手法適用後の IRDT における残余電力の変化を示す。既存の IRDT 場合、各ノードにおける消費電力が大きければつきがあるにもかかわらず、間欠周期が 0.3 s で一定であるため、残余電力は直線的に減少する。その結果、ノード 12 の電池が枯渇することによりネットワーク寿命に到達した時点では、多くのノードの電力がまだ残っている。しかし、提案手法を適用した場合は、同じホップ数のノード間

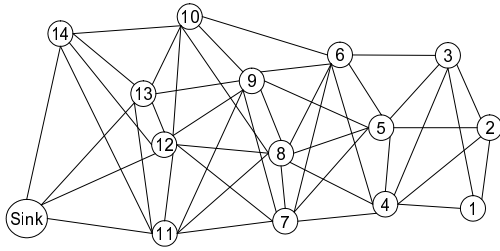


図 4 シミュレーション対象トポロジー

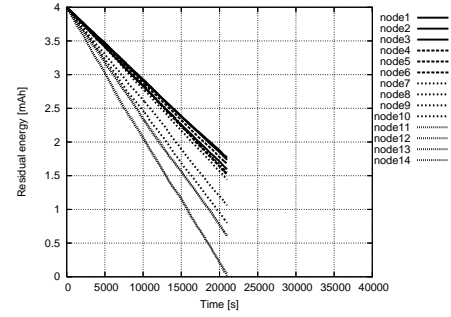
表 1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
ノード当たりのデータ発生率	0.01 packet/s
初期電力量	4 mAh
初期間欠周期	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

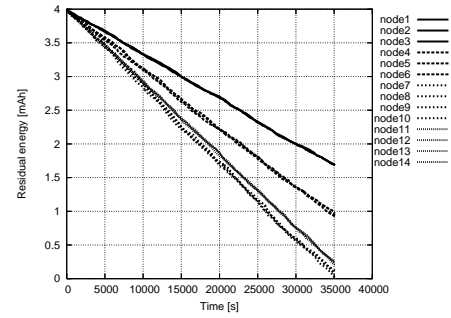
の消費電力のばらつきが抑制されており、それぞれのホップ数に応じて残余電力が等しくなるように制御されていることがわかる。また、その結果として、ネットワーク寿命が延びていることが確認できる。また、パケット発生率を変化させた場合の、ネットワーク基本性能の比較を図 6 に示す。提案手法によりネットワーク寿命を約 75% 延長できるが、パケット収集率はほとんど影響を受けていないことが示された。これは、残余電力の相対的な関係に基づいて間欠周期を制御することによって、あるホップ数のノード全体として、負荷を処理するための稼働率が維持されているからである。また、パケット遅延時間は増加しているが、各ノードの間欠周期が全体として増加しているためと考えられる。本稿で想定しているネットワークアプリケーションでは、遅延時間に対する要求品質は厳しくないため、この程度の遅延増加は許容できるものとする。

4.2 提案手法におけるロバスト性の評価

次に、提案手法がさまざまな状況の変化に対応できるロバスト性を持つことをシミュレーションによって示す。図 7(a) には、各ノードの電池の初期電力にばらつきがあった場合のシミュレーション結果を示す。ここでは初期値として 4~8 mAh を設定したが、時間経過につれてホップ数ごとに収束しながら動作しているのが確認できる。また、図 7(b) は、シンクから 1 ホップ目および 2 ホップ目において最も負荷の高いノード 7 と 12 に関して、時刻 25000 s において電池を交換し残余電力を初期化した結果である。電池交換を行なった時点では、ノード 7 と 12 の残余電力が最も大きいので、間欠周期が T_{min} に設定されるため消費電力の減少が大きく、傾きが大きくなっている。しかしながら、隣接する他のノードは相対的に残余電力が小さいため、間欠周期が大きく、残余電力の傾きは小さい。やがてノード 7 や 12 の電力が他のノードと同等になると、互いに同



(a) 既存の IRDT



(b) 提案手法適用後の IRDT

図 5 残余電力変化の比較

じような間欠周期での動作となる。この結果、2 つのノードの電池を交換するだけで、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。

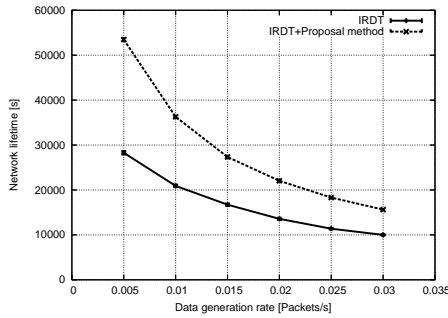
4.3 間欠周期の上限値 T_{max} の解析的導出

図 8 は、提案手法における各パラメーター値がネットワーク寿命に与える影響を示した結果である。図 8(a) より、間欠周期の上限値 T_{max} がネットワーク寿命に大きな影響を与え、また最適値 (図では $T_{max} = 0.9$ s) が存在することが示されている。また、図 8(b), 8(c) では、間欠周期の下限値 T_{min} および間欠周期の増減量 α がネットワーク寿命に与える影響は大きくないことを示している。 T_{min} に関しては、これ以上大きな値を設定すると、負荷を処理しきれないために、パケット収集率が低下しパケット遅延時間が大きくなってしまふ。

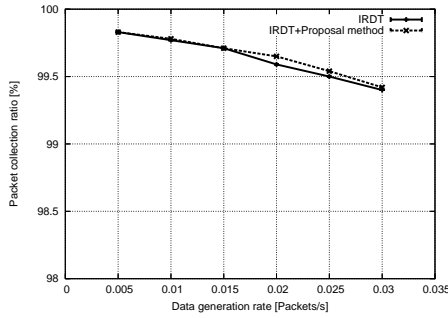
以上より、提案手法において間欠周期の上限値 T_{max} がネットワーク寿命に大きな影響を与えることが明らかになったため、この最適値を解析的に導出することを試みる。センサネットワークではシンクに負荷が集中するため、消費電力が最も大きくなるのはシンクから 1 ホップ目と 2 ホップ目のノードである。あるノードの電力が枯渇した時点ネットワークの寿命であると考え、これらのノードのうち、消費電力が最大となるノードの消費電力量を最小化することができる T_{max} が最適であると考えられる。したがって、ノード i の総消費電力量を $E_{total}[i]$ とすると、 T_{max} の最適値は以下のように表される。

$$T_{max} = \arg \min \left\{ \max_{i \in \text{hop1, hop2}} \{E_{total}[i]\} \right\} \quad (1)$$

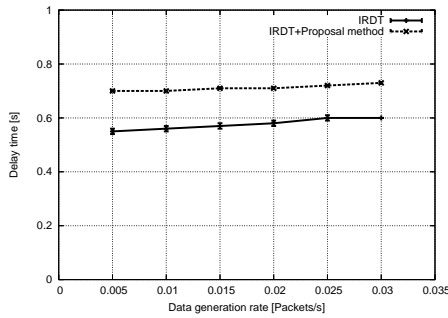
解析手法として、ノードにおける単位時間当たりに消費される総電力を表現し、それを最小化することにより、間欠周期の



(a) ネットワーク寿命



(b) パケット収集率



(c) 遅延時間

図 6 既存の IRDT と提案手法適用後の IDRT との基本性能比較

上限値である T_{max} の値を求める． N_a を単位時間当たりを上流から到着するパケット数， N_g を単位時間当たり発生するパケット数とする．また， E_{rec} は単位時間当たりパケットを受信するのに消費される電力， E_{send} は単位時間当たりパケットを送信するのに消費される電力， E_{ID} は単位時間当たり無駄に ID を送信するのに消費される電力とすると，単位時間当たりの総消費電力は以下のように表せる．

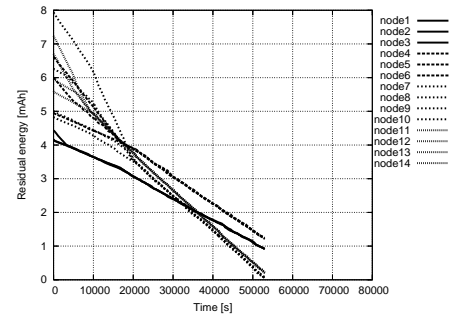
データ受信消費電力

P_{rec} は 1 個のデータを受信するのに消費される電力とする．ノードは ID を送信した後，すぐにデータを受信したと考えると，その消費電力は以下ようになる．

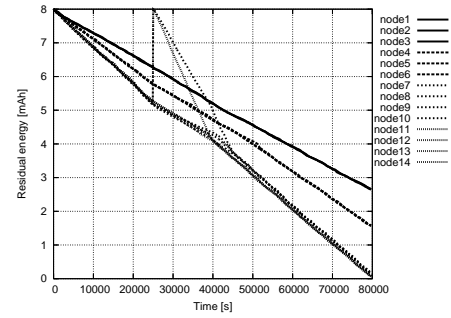
$$E_{rec} = P_{rec} \cdot N_a \quad (2)$$

データ送信消費電力

P_{wait} は ID 待ち状態で消費される電力， P_{send} は 1 個のデータを送信するのに消費される電力とする．単位時間当たりデータ送信するのに消費される電力は以下ようになる．ここで， T_{wait} は平均 ID 待ち時間であり，送信すべきデータを持った時点から，下流ノードから初めて ID を受信するまでの平均



(a) 電池の初期電力にばらつきがある場合



(b) 25000 s にノード 7 および 12 の電池を初期化した場合

図 7 提案手法におけるロバスト性に関するシミュレーション結果

時間と考える．

$$E_{send} = (T_{wait} \cdot P_{wait} + P_{send}) \cdot (N_a + N_g) \quad (3)$$

ID 送信消費電力

ID を送信したが，上流ノードからのパケットを受信できずに，再びスリープ状態になることにより消費される電力の単位時間当たり量を以下の式で表す．ここで， T_{avg} は自己の平均間欠周期であり， T_{id} は SREQ パケットの最大待ち時間とする．

$$E_{ID} = \left(\frac{1}{T_{avg}} - N_a \right) \cdot (P_{ID} + P_{wait} \cdot T_{id}) \quad (4)$$

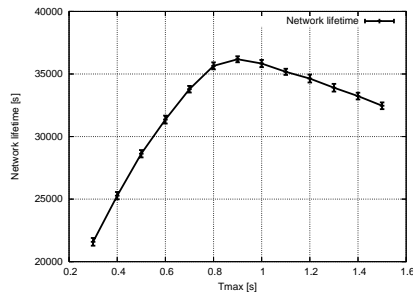
全消費電力

以上の式を統合すると，あるノードにおいて単位時間当たり消費される電力は以下ようになる．

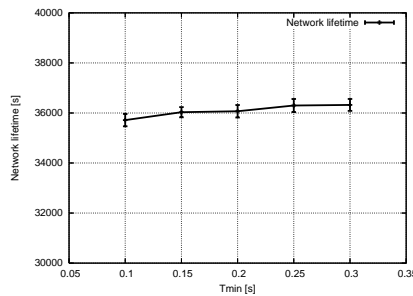
$$E_{total} = E_{rec} + E_{send} + E_{ID} \quad (5)$$

解析とシミュレーションとの比較

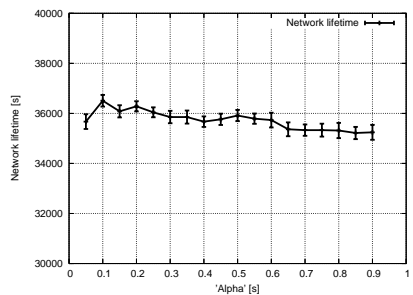
前述の通り，ホップ 1 およびホップ 2 における最も負荷が大きいノードは，ノード 12 およびノード 7 である．そこで，これらのノードに対して式 (5) により消費電力を計算し，消費電力が最小値になるような T_{max} を求めれば良い．ノード 12 の場合，まず T_{wait} を計算する必要がある．ノード 12 は直接シンクに接続されており，シンクの間欠周期が 0.3 s であるため，平均待ち時間は $T_{wait}=0.15$ s になる．また，負荷が高いノードは，提案方式による制御のために，間欠周期が T_{max} に近いところで動作し続けるので， $T_{avg}=T_{max}$ と考えることができる．ノード 7 に関しては，同じくホップ 2 のノードにおける消費電力を計算する必要がある．ここで，平均間欠周期は $T_{avg} = T_{max}$



(a) 間欠周期の上限値: T_{max}



(b) 間欠周期の下限値: T_{min}



(c) 間欠周期の増減量: α

図 8 制御パラメータ値によるネットワーク寿命の変化

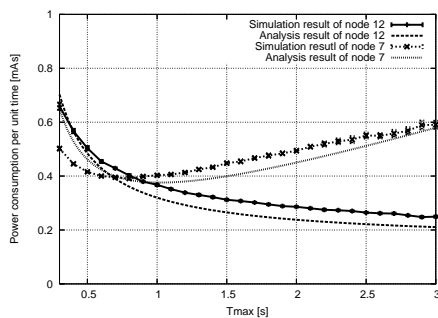


図 9 シミュレーションと解析の比較

である。平均 ID 待ち時間は、前向きノードの平均間欠周期 $(T_{max} + T_{min})/2$ の半分であり、 $T_{wait} = (T_{max} + T_{min})/4$ である。ノード 7 およびノード 12 における消費電力の解析結果とシミュレーション結果の比較を図 9 に示す。最適な T_{max} は、式 (1) を満たす場合であるが、シミュレーションでの最適値 $T_{max} = 0.9$ s にほぼ近い値を解析的に得ることができている。

5. おわりに

本稿では、間欠動作に基づいた受信端末駆動型 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、各ノード

が残余電力情報を活用した間欠周期の制御手法により、ネットワークを長寿命化する手法を提案した。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、ネットワーク寿命を約 75% 延ばせることが明らかになった。また、ネットワーク寿命に大きな影響を与えるパラメータである間欠周期の上限値 T_{max} に関して、その最適値を解析的手法による導出した。今後の課題として、周辺ノードの送信パケットの影響を考慮した、より精度の高い解析を行なうことと、さまざまなネットワークに対して提案手法が適用できることを確認することが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、大川情報通信基金によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, vol. 52, pp. 2292–2330, Aug. 2008.
- [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] 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.
- [4] 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 (SenSys '04)*, pp. 95–107, Nov. 2004.
- [5] 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.
- [6] Y. Sun, O. Gurewitz, and D. Johnson, "RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '08)*, pp. 1–14, 2008.
- [7] T. Hatauchi, Y. Fukuyama, M. Ishii, and T. Shikura, "A power efficient access method by polling for wireless mesh networks," *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, vol. 128, pp. 1761–1766, Dec. 2008.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] D. Chuluunsuren, 小南大智, 菅野正嗣, 村田正幸, 畠内孝明, "受信端末駆動型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," *信学技法 (AN2010-3)*, pp. 11–14, May 2010.