

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[†] 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 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 羽曳野市はびきの 3-7-30

^{†††} 富士電機システムズ 〒 191-8502 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 センサネットワークにおいて、消費電力の抑制による長寿命化が重要な課題となっている。受信端末駆動型通信方式は、各ノードが間欠的に ID パケットを送信し、送信データを保持するノードがその ID パケットを受信することで通信を開始する。これにより平均消費電力を抑制できるが、消費電力が最も大きな端末の電力が枯渇した時点でネットワークの一部が停止してしまう。本稿では、ID パケットを利用して残余電力情報を交換することでその平均化を行ない、ネットワークを長寿命化するための手法を提案する。シミュレーションにより、パケット収集率と遅延時間を維持したまま、ネットワーク寿命を約 50% 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

Lifetime Extension Based on Residual Energy for 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 realization of sensor network systems, extension of operating time by control of power consumption has been an important research subject. The receiver-driven type communication protocol starts communication when the receiver nodes transmit ID intermittently then the sender nodes received ID from the receiver nodes. The network stops when the battery of the biggest power consumption node dries up though the average power consumption of the network is reduced. we propose a method to extend network lifetime, by equalizing the power consumption by exchanging residual energy information by using the ID packet. We show that a network life can be prolonged about 50%, with network performances maintained, such as a packet collection rate and delay.

Key words sensor network, residual energy, loadbalancing, lifetime-extention

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。

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、それに関する研究が活発に行われている。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 [1] と非同期式 [2, 3] 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 [2] と受信端末駆動型 [3] の方式に分類される。

本稿では、電力メータなど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 [3] 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 [4]。IRDT 方式により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、消費電力の最も大きいノードの電力が最も早く枯渇するため、他の大部分のノードの電力が残っているにもかかわらず、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。従来、残余電力情報に基づいた負荷分散に関する研究が多数なされている。例えば、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 [5] 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 [6] 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、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。提案方式では、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。各ノードは、周辺ノードと自己の残余電力に基づき、間欠動作の制御を行なうことを目的とする。

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。

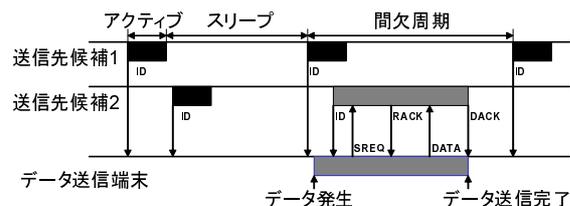


図 1 IRDT 方式におけるデータ通信

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。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路するノード数のデータベースである。以降では、経路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。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。

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。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後に行う。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ない限りは横向き転送を行う。

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 [4]。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。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、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。本稿では、このような考えに基づき、残余電力に応じて間欠周期を制御し負荷分散を行うことで、消費電力を平均化するための方式を提案する。

3. 残余電力情報を活用した負荷分散

IRDT 方式において、各ノードは定期的に自己の ID を送信しているが、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。各ノードは ID を受信するたびに、構成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をする仕組みは、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。

次に、残余電力情報を活用した間欠周期の制御による負荷分散手法を説明する。周囲ノードと自己の残余電力の相対的な関係により間欠周期を制御することで、負荷分散が実現できる。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、自己の間欠周期を制御する。横向きノードと比較する目的は、ホップ数が同一のノード群の負荷を平均化することで電力消費の偏りを防止することである。各ノードは式 (1) に従って自己の間欠周期を決定する。

$$T(t+1) \leftarrow \min \left\{ T_{max}, T(t) \cdot \left(1 + \frac{Y(t) - E(t)}{K \cdot E_{max}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $T(t)$ 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、 E_{max} は初期電力量である。

定数 K は、残余電力差が生じた時に、間欠周期を増減させる量を定めている。 K が小さすぎると間欠周期を増減させる量が大きくなるため、時間ごとの残余電力が激しく振動する。一方、 K が大きすぎると間欠周期を増減させる量が小さくなるため、制御の効果が小さくなってしまふ。従って、間欠周期の増減頻度が最適であるように設定する必要がある。

また、定数 T_{max} は間欠周期の上限値を定める数値である。

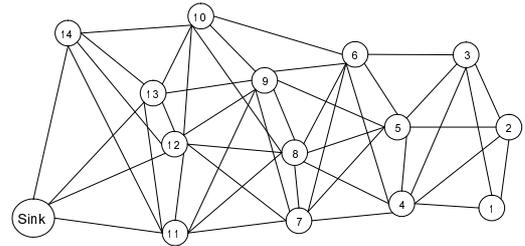


図 2 シミュレーションモデル

表 1 シミュレーションパラメーター

パラメーター	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

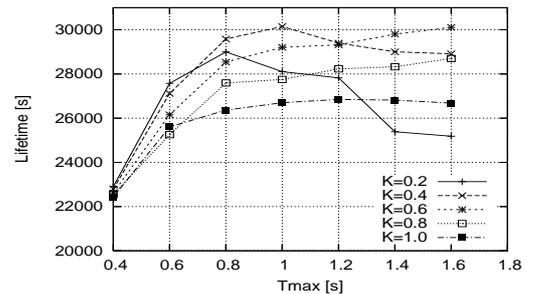


図 3 定数 K と定数 T_{max} に対するネットワーク寿命

消費電力が少ないノードは、提案方式により間欠周期が長くなっていくが、間欠周期の長さによって消費電力の抑制加減が決まる。しかしながら、受信ノードの間欠周期が長くなりすぎると、送信ノードでは ID 待ち時間切れによるパケット損失が増えるため、データ収集率が低下してしまうという問題が発生する。また間欠周期が長くなりすぎた状態から、適切な値へ移行するための時間がかかってしまうことも問題となる。そのため、提案方式では T_{max} によって間欠周期の上限値を設けてこれを防いでいる。

4. シミュレーションによる提案方式の評価

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 2 に示すようなトポロジーを持つネットワークを用いた。また、主なパラメータを表 1 にそれぞれ示す。

図 3 と図 4 に、定数 K と定数 T_{max} に対するネットワーク寿命と各ノードの残余電力の変化を示す。図から、 K が小さすぎる場合は、間欠周期を増減させる頻度が大きくなり消費電力が増加する (図 4(b)) ことと、 K が大きすぎる場合は、間欠

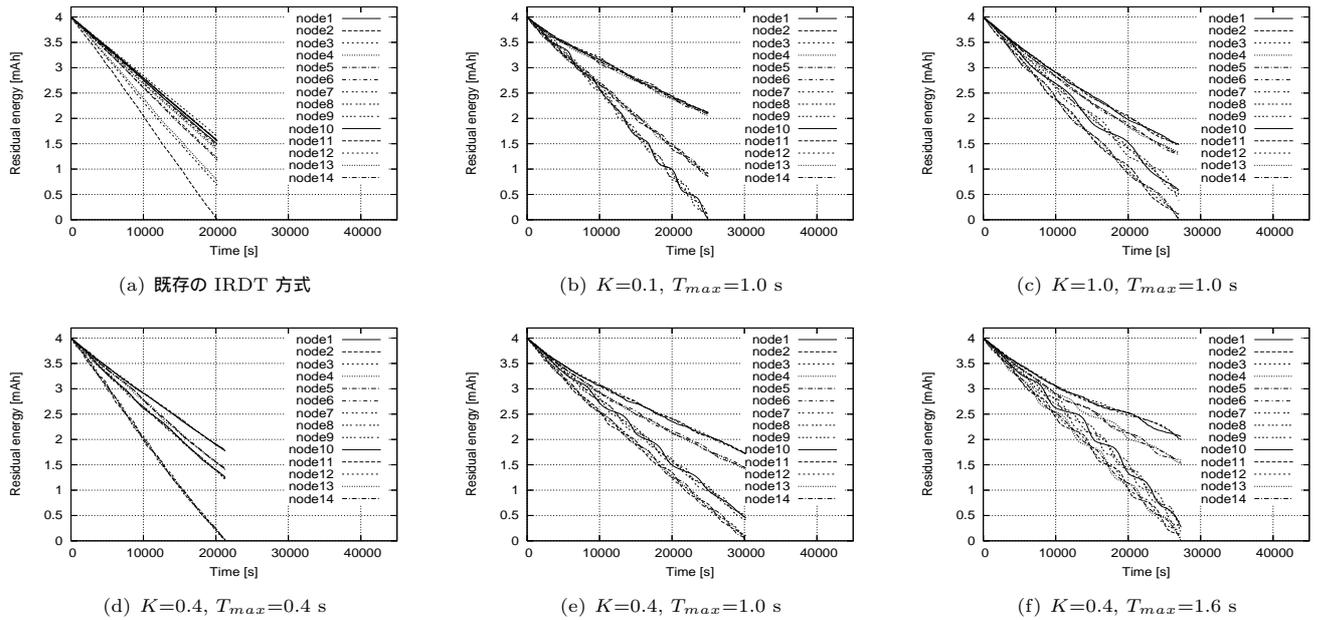


図 4 各ノードの残余電力の時間変化

表 2 提案手法による性能改善

	既存の IRDT	提案手法
ネットワーク寿命	20724 s	30275 s
平均遅延時間	0.50 s	0.57 s
パケット収集率	99.8 %	99.7 %
最後の 1000 秒間の収集率	99.3 %	98.8 %

周期を増減させる頻度が小さくなり、残余電力への影響が遅くなる(図 4(c)) ことがわかる。いずれの場合も、ネットワーク寿命は短くなってしまふ。しかしながら、適切な値が存在し、本シミュレーションでは $K=0.4$ であることが明らかになった(図 4(e) および図 3)。また、定数 T_{max} により間欠周期の変動幅が大きくなるにつれて、残余電力の振幅が大きくなる(図 4(d), 4(e), 4(f) から確認できる)。残余電力の振幅によってネットワーク寿命が変化するが、シミュレーションの結果 $T_{max}=1.0$ が最適値であることが明らかになった(図 3)。図 4(e) に示されるように、適切な制御を行なうことにより、残余電力はシンクまでのホップ数に応じて平均化され、最も消費電力が大きくなるノード群の残余電力の変化の傾きが小さくなっている。なお、 $K=0.6$, $T_{max}=1.6$ の組み合わせの場合もネットワーク寿命は大きいだが、パケット収集率が低下するため適切な設定値とはいえない。

また、提案方式による性能改善の結果を表 2 に示す。提案方式によりネットワーク寿命を約 50%延長できるが、パケット収集率と遅延時間はほとんど影響を受けていないことが示された。

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に、ネットワーク寿命を約 50%延ばせることが明らかになった。今後は、解析的手法による制御パラメータの導出、および提案方式のロバスト性について検討する。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (A) 21240004、積水化学自然に学ぶものづくり研究助成プログラム、および大川情報通信基金によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.