

推薦論文

受信ノード主導型MACプロトコルのビーコン削減に基づいた長寿命センサネットワーク

横谷 晟人^{1,a)} 吉廣 卓哉^{2,b)}

受付日 2017年5月10日, 採録日 2017年9月5日

概要: バッテリ駆動の小型センサ端末を設置し, 無線マルチホップ通信により測定データを集める無線センサネットワークにおいて, 従来手法と比較して大幅にネットワーク寿命を延ばす MAC および経路制御プロトコルを提案する. 受信ノード主導型 MAC プロトコルは, 消費電力を抑えセンサノードの寿命を延ばす MAC プロトコルとして知られている. 本論文では, これを拡張し, データ配送木における葉ノードでビーコン送信を省き, 経路制御プロトコルと連携させることにより, さらに消費電力を削減する. 葉ノードでビーコン送信を省くことで, トポロジ変化時に葉ノードへ制御メッセージが送信できず, 配送木の修復効率が悪化するという問題が起こる. これに対しては, 葉ノードとの連絡経路を維持する仕組みを導入し, トポロジ変化時にも効率的に配送木を修復する. また, 電力残量が低下したノードを避けるように定期的に配送木を再構築する仕組みにより, ネットワークが機能する時間を延ばす. 最新のセンサ端末の性能を考慮したシミュレーション評価により, センサネットワークの寿命が大幅に増大できることを示す.

キーワード: 無線センサネットワーク, MAC プロトコル, 経路制御プロトコル, 低消費電力

A Joint MAC and Routing Protocols for Wireless Sensor Networks Based on Receiver Initiated MAC

MASATO YOKOTANI^{1,a)} TAKUYA YOSHIHIRO^{2,b)}

Received: May 10, 2017, Accepted: September 5, 2017

Abstract: We propose a new joint MAC and routing protocol to prolong the lifetime of WSNs based on receiver-initiated MAC protocols. Receiver-initiated MAC protocol is known as a family of MAC protocols that significantly reduce the energy consumption in WSNs. In this paper, we extend this kind of MAC protocols by modifying the beacon transmissions and design a routing protocol considering it to further reduce energy consumption. We introduce a mechanism to maintain the channel to exchange routing messages among nearby nodes to achieve efficient update of delivery tree in WSNs. We evaluate the proposed method through simulations considering up-to-date sensor hardware to show the performance of power reduction in the proposed protocols.

Keywords: wireless sensor network, MAC protocol, routing protocol, low energy consumption

1. はじめに

あらゆる場所にセンサを設置して利活用する技術として, IoT が大きな注目を集めている. 電源のない場所にセンサ端末を設置して無線マルチホップ通信によりセンシング

本論文の内容は 2016 年 10 月の第 24 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2016) にて報告され, 同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

² 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

a) m_yokotani@fw.ipsj.or.jp

b) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

データを集める無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) は, IoT の実用化に大きく寄与する技術として, さかんに研究されている. WSN においては, これまでセンサを設置することが困難であった場所にもセンサ端末を設置することができ, 環境センシング等の現実的な応用も見込めることから, 防災や製造業といった広い分野で応用が検討されている [1].

WSN に特有の特徴として, 多くの場合にバッテリーによる駆動が要求される点がある. WSN を長期にわたり安定して実運用するには, 省電力化によるノードの長寿命化の実現が必要である. そこで, 近年では IEEE802.15.4 [2] といった WSN に適応させた省電力な通信規格が標準化されている. しかしながら, 標準的な乾電池やボタン電池を用いる場合には, ノード寿命は長くても 1~2 年程度である. WSN を社会で安定して実運用するためには, 乾電池等の現実的な電源により, 敷設してから 10 年程度の長期間にわたり継続的に運用できることが望ましいが, 現行のプロトコルでは実現が困難である.

これに対して小島らは, WSN における低消費電力 MAC プロトコルである受信ノード主導型 MAC プロトコルを拡張し, 配送木の葉ノードが定期的送信するビーコンを省くことで消費電力を削減し, ノード寿命を延ばす手法を提案した [3]. 葉ノードのビーコンを省くことで, 葉ノードが他のノードからデータフレームを受信できなくなるが, 配送木に沿ってメッセージを伝える経路制御プロトコルを併用することで, ノード故障等のトポロジ変化時にも自律的に配送木を修復する動的な配送木の制御を実現する. しかし, 小島らの方法では, ノード故障が一カ所で発生した場合でも, これが配送木に沿って全体に周知され, 全ノードが参加して配送木が再構築される. 再構築時には葉ノードもメッセージを交換する必要があるため, ネットワーク全体で消費電力が浪費されることが問題である. さらに, 大規模なネットワークではノード数に比例してノード故障の頻度が上がるため, 再構築の頻度も上がり, スケーラビリティの問題も生じる. これらの問題を解決するためには, ノード故障等のトポロジ変化に対して, その周辺のノードのみが参加する局所的な配送木の修復が求められる.

本論文では, 小島らのプロトコルを拡張し, トポロジ変化に対する局所的な配送木の修復手法を提案する. さらに, WSN が自律的にノードの残余電力の低下を検出し, 適応的に配送木の局所修復を繰り返すことにより, ネットワーク全体の電力を有効利用し, 電力枯渇によるノードの停止ができるだけ発生しない長寿命な WSN を実現する. 従来手法として, 全ノードの電力を平均的に消費する経路制御法によりネットワークを長寿命化する手法は知られているが [4], [5], 提案手法は MAC プロトコルと経路制御の組み合わせ効果によりさらに電力効率を高め, 従来法よりも大幅な長寿命化を実現できる.

提案手法は, 3つの部分からなる.

まず, MAC プロトコルは, 小島らの手法と同じ方法を用いる. 基本的には受信ノード主導型 MAC プロトコル RI-MAC [6] を用いるが, 配送木の葉ノードとそれ以外のノード (中継ノードと呼ぶ) を区別し, 受信が不要な葉ノードのビーコン送信を停止する.

次に, 経路制御プロトコルは, 消費電力の低い葉ノードの割合をできるだけ大きくする小島らの手法を踏襲し, 局所修復を可能にするように拡張する. 提案手法では, 局所修復を行うために, 配送木における親子関係がない近隣ノードとのメッセージ交換を可能にする仕組みを導入する. 具体的には, 近隣ノードに連絡するための連絡ホップを適切に設定し, トポロジ変化時には連絡ホップを用いてすべての近隣ノードがメッセージを交換することで, 局所的に配送木を修復する.

最後に, 残余電力に基づいた動的な配送木の再構築機能を, 経路制御プロトコルに組み入れる. 各ノードは, 残余電力が一定以下になると周囲のノードに周知し, 配送木の再構築を開始させる. 新たな配送木では, 残余電力が低いノードはパケットの中継をしない葉ノードになることで, 電力切れによるノードの停止をできるだけ防ぎ, ネットワークの寿命を延伸する.

本論文は以下のように構成される. 2章では, WSN の長寿命化に関する関連研究を示す. 3章で基礎となる小島らの手法を述べたうえで, 4章で提案手法を説明する. 5章では最新のセンサ端末を精密にモデル化することにより, シミュレーションに基づいた提案手法の評価を行う. 最後に 6章で本論文をまとめる.

2. 関連研究

2.1 低消費電力 MAC プロトコル

ネットワーク全体の消費電力を低く抑える低消費電力 MAC プロトコルが数多く提案されている. これらは, ノードを定期的にスリープさせながら, タイミングを合わせて隣接ノード間のデータ通信を行うことで, 通信データ量に見合った低い消費電力で信頼性のある通信を実現する. B-MAC [7] と X-MAC [8] は, 送信ノード主導の MAC プロトコルである. B-MAC は, ノードが一定時間ごとにスリープとウェイクを繰り返し, データ送信時にはその時間間隔よりも長いプリアンブルを送ることで, データ送信時に受信ノードがウェイク状態で待機できる. しかし, 送信ノード主導型 MAC プロトコルは, プリアンブル送信等の送受信タイミング同期処理にかかる電力が大きく, 消費電力の低減には限界がある. そこで, より消費電力が低い効率的な MAC プロトコルとして, RI-MAC [6] や RC-MAC [9] 等の受信ノード主導型 MAC プロトコルが提案されている. これら受信ノード主導型のプロトコルでは, データを受信するノード (受信ノード) が定期的にビーコンを送信し, 送

信したいフレームを持つノード（送信ノード）は、ビーコンを受信したときに受信ノードにフレームを送信することで、受信ノードの受信待受時間を小さく抑えられる。送信ノードは、ビーコンを受信するまで受信待受状態で待てばよいので、プリアンプルを長時間送信するよりも消費電力を低く抑えられる。受信ノード主導型として初めて提案された RI-MAC [6] は、ビーコン受信後に送信ノードがバックオフ時間だけ待機することで、送信ノード間の競合解決がなされる。これを拡張した RC-MAC [9] では、データフレーム受信後に送信ノードに返される ACK フレームを用いて受信ノードが次に送信するノードを指定できる。つまり、受信ノードが効率的に送信順序をスケジュールすることでバックオフ時間を省き、消費電力を低減させる。

しかしながら、受信ノード主導型 MAC プロトコルにおいては、定期的なビーコン送信と、これにともなう受信待機時間が電力消費に占める割合が大きくなり、長いノード寿命の実現にあたって問題となる。

2.2 長寿命化のための経路制御

経路制御に関しては、センサネットワークに適した配送木を構築する手法が多数提案されている。Luo らは、複数存在する最短路木の中から、センサネットワークの生存時間を最大化するような配送木を構築するアルゴリズムを提案した [10]。Kuo らは、屋内の電源が接続されたセンサネットワーク等を対象として、ネットワーク全体の消費電力を最小化するような配送木を構築するアルゴリズムを提案した [11]。しかし、これらは最適化問題を定式化して解く集中制御に基づいた方法を提案しており、故障等によるトポロジの変化に対応して自律分散的に配送木を計算することはできない。消費電力を全ノードで均等化する動的な経路制御方式も提案されている [4], [5]。これらは、できるだけ残余電力が大きいノードを用いて配送木を維持することで、各ノードの電力を均等に利用し、ネットワークを長寿命化する。しかし、これらは経路制御のみでの長寿命化を目指しており、長寿命化の効果が限定される。また、いまだに受信ノード主導型 MAC プロトコルを想定したネットワーク長寿命化のための動的な経路制御手法は存在しない。

3. 小島らの省電力 WSN [3]

3.1 想定する環境

本論文では、小島らの手法と同様に、何らかのセンサと無線通信機能を持ったセンサノードを、フィールド上に多数設置した WSN を想定する。各センサノードは一定時間ごとにセンサから値を取得してデータパケットを生成し、フィールド上に存在するシンクノードへマルチホップ通信を用いて転送する。また、各ノードの送受信電力は一定であり、シンクノードまで複数の経路を用いることが可能な

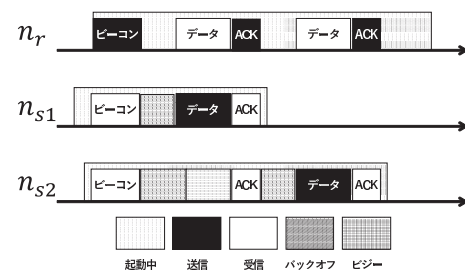


図 1 RI-MAC 送受信手順
Fig. 1 RI-MAC protocol.

程度にはノードの配置密度が高いことを想定する。

3.2 受信ノード主導型 MAC プロトコル

低管理コスト無線センサネットワークの MAC プロトコルは、受信ノード主導型 MAC プロトコルの 1 つである RI-MAC [6] を基礎としている。ここでは RI-MAC の動作について簡単に説明する。

RI-MAC におけるデータフレーム送受信手順を図 1 に示す。データフレームを受信する受信ノード n_r は、定期的に周囲のノードに対してビーコンを送信する。送信するデータを持つ送信ノード n_{s1} , n_{s2} は、ビーコンに合わせてスリープ状態からウェイクする。受信ノードから送信されたビーコンを受信すると、送信ノード n_{s1} , n_{s2} は、ランダム時間のバックオフ待機後に、データフレームの送信を開始する。待機中に他のノードによるデータ送信が開始されたことを検知した場合は、データの送信をやめることで、データフレームの衝突を回避する。図 1 では、 n_{s1} のバックオフ時間が n_{s2} のバックオフ時間に比べて短いため、 n_{s1} が先に送信を開始する。受信ノード n_r はデータフレームの受信が正常に完了すると、送信ノード n_{s1} に対して ACK フレームを送信し、ACK フレームを受信した送信ノード n_{s1} はスリープ状態に移行する。受信ノード n_r は周囲のノードとビーコンを送信するスケジュールを適切にずらすことにより、周囲との通信の衝突を避けることができる。

3.3 小島らの手法の概要

小島ら [3] は、ビーコンの省略によって配送木における葉ノードを長寿命化すると同時に、定期的に電池交換やノード交換が必要な、データパケットの中継を行うノードの数ができるだけ少ない配送木を形成することで、管理コストを抑え長期運用が可能な「低管理コスト無線センサネットワーク」を実現した。葉ノードにおける主な電力消費要因であるビーコンを省くことにより、葉ノードの寿命を大幅に延ばし、定期的な電池交換を不要にした。また、定期的な電池交換が WSN の管理における主要なコストの 1 つであるが、電池交換を要する中継ノード数をできるだけ削減することで、管理コストを低減させている。小島らの手法では、葉ノードの寿命は大幅に増大した一方で、ネットワー

クが必要な機能を維持する時間、つまりネットワークの寿命は考慮されていない。先述のように、小島らの手法は、RI-MACを改変して葉ノードのビーコンを省いたMACプロトコルと、葉ノードの数をできるだけ抑えた配送木を構築し、トポロジ変化時には動的に配送木を再構築する経路制御プロトコルからなり、これらが連携して機能する。

3.4 MACプロトコルの概要

センサの測定値をマルチホップ通信でシンクに送信する場合には、配送木の末端に位置する葉ノードは測定値を定期的に次ホップノードに送信すればよく、他のノードで生成された測定値を中継する必要はない。そこで、RI-MACにおいて他ノードからのデータ受信時に要する、ビーコンの定期的な送信を停止する。これにより、葉ノードは、次ホップノードからのACKフレーム以外のいっさいのデータ受信ができなくなるが、消費電力において大きな割合を占めているビーコン送信およびウェイク時間が削減されることで、葉ノードは大幅に省電力化、長寿命化され、電池交換なしに非常に長期間動作することが可能となる。他のノードから受信したデータを転送する必要がある中継ノードは、RI-MACに準じて、定期的にビーコンを送信する。

また、配送木の再構築においては、経路制御プロトコルの制御メッセージがブロードキャストされることが必要であるが、RI-MACはブロードキャストをサポートしない。そこで小島らは、「定常状態」と「配送木構築状態」の2状態を新たに導入し、配送木の構築時にのみブロードキャストを可能にする。「定常状態」は消費電力が低い動作となる。先述のとおり葉ノードはビーコン送信を停止し、中継ノードはRI-MACに準じて動作する。一方、「配送木構築状態」では、RI-MACと同様に定期的なビーコンの送信を行うが、ノードはスリープ状態には移行せずつねに受信待機状態となる。すなわち、配送木構築状態にあるノードは常時フレームの送受信が可能であることから、経路制御プロトコルの制御メッセージをブロードキャストできる。配送木構築状態はつねに受信待機を行うため、消費電力量が大きい。そのため、ノードが配送木構築状態となってから一定時間が経過すると、配送木の再構築が完了したと判断し、定常状態に遷移する。

3.5 経路制御プロトコルの概要

MACプロトコルでは、定常状態でビーコンを省略することで、葉ノードの寿命を大幅に延長した。しかし、中継ノードはビーコンを省略できないため寿命が短く、定期的なバッテリー交換を要する。小島らの経路制御プロトコルでは、少数の中継ノードに通信を集中させることにより、中継ノードの数ができるだけ小さい配送木を構築する。

配送木の構築は、ノードが配送木構築状態にあるときに行われる。まず、各ノードはシンクまでの距離（ホッ

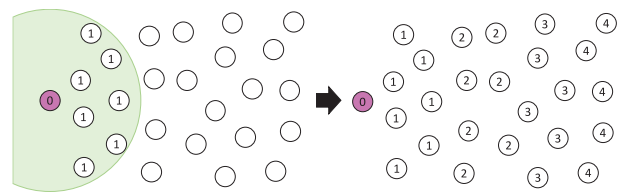


図2 シンクノードからのホップ数把握

Fig. 2 Determining hop-counts from nearest sink.

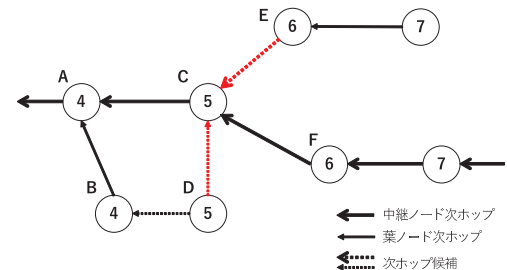


図3 低管理コスト無線センサネットワークの経路制御プロトコルによる次ホップ選択

Fig. 3 Example of next-hop selection on low-management-cost WSNs.

プ数)を把握する。初期状態では、シンク n_{sink} のみが距離 $level(n_{sink}) = 0$ であり、他のノードのシンクからの距離は無量大 (∞) で初期化される。各ノード n_s は制御メッセージを定期的送信し、その中に自分の距離 $level(n_s)$ を含める。 n_s から制御メッセージを受信したノード n_r は、受信した $level(n_s)$ と n_r が保持する $level(n_r)$ を比較し、 $level(n_r) > level(n_s) + 1$ であれば、 $level(n_r)$ を $level(n_s) + 1$ に更新する。この動作を全ノードが繰り返すことで、最終的に全ノードの距離が確定する。図2は、シンクに近い順に距離が決定され、最終的には全ノードが正しい距離を把握する様子を示す。

次に、各ノードは次ホップを選択する。各ノード n は、制御メッセージに $level(n)$ に加えて、次ホップ ID $par(n)$ と、子孫ノード数 $children(n)$ を定期的ブロードキャストする。すべての隣接ノードから制御メッセージを受信すると、隣接ノードの中で子孫数が最大のものを次ホップとして選択する。ただし、中継ノード ($par(n) > 0$) はシンクからの距離が1小さいノード、葉ノード ($par(n) = 0$) は距離が同じまたは1小さいノードから次ホップを選択することで、経路ループの発生を防ぐ。できるだけ子孫数が多いノードを次ホップに選ぶことで、パケット中継をできるだけ一部のノードに集約し、中継ノード数が少ない配送木を構築できる。ノードが配送木構築状態になると、一定時間経過後に定常状態に遷移することで、経路制御プロトコルによる配送木の構築処理が完了する。

図3に動作例を示す。ノードに付与されている数字は、シンクからの距離を表す。ノードEは、自分を次ホップとして選択した子孫があるため、中継ノードである。よって、自分より距離が1小さいノードの中から、Cを次ホップと

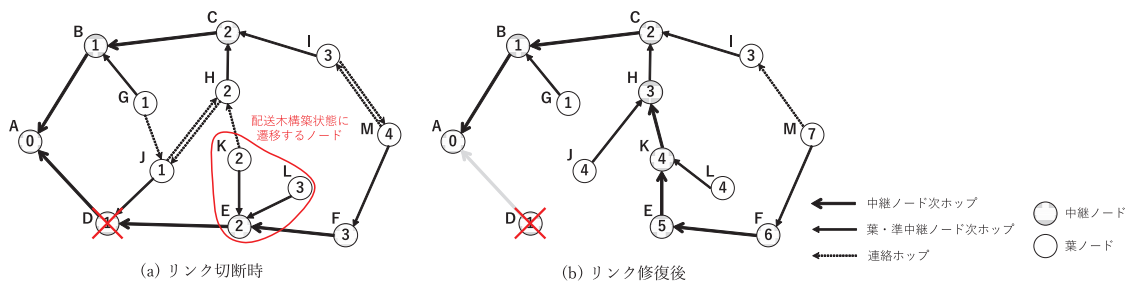


図 4 配送木再構築の概要

Fig. 4 Example of local reconstruction.

して選択する．子孫がない葉ノード D の場合には，同じ距離のノードを次ホップにすることを許される．このため， B より子孫数が多い C を次ホップに選ぶことで， B を葉ノードのまま維持し，中継ノードの数を低く抑えられる．

3.6 小島らの手法の問題点

全ノードが定常状態になった後，ノード故障等によりネットワークトポロジが変化すると，正常なデータ収集を維持するために配送木の再構築が必要になる．このためには，障害発生地点から一定の範囲にあるすべてのノードが配送木構築状態に遷移し，経路制御プロトコルの手順に従って次ホップを再選択する必要がある．しかし，葉ノードはビーコンを発しないため，近隣ノードからメッセージを送って配送木構築状態に遷移させることができない．葉ノードには，その親ノード（次ホップノード）により，データ送受信時にメッセージを伝達できるが，中継ノードが疎な配送木が構築されているため，親である中継ノードにメッセージを送ることも容易ではない．そこで小島らの手法では，障害発生を直接的に検知したノードから，配送木に沿って，データ送受信時に障害発生を伝達する方法を用いる．この方法では，障害発生時点から一定の範囲にあるノードのみを配送木構築状態にすることが困難であり，配送木に沿ってネットワーク内の全ノードが配送木構築状態になる．配送木構築状態のノードはつねに受信待機をするため，消費電力が非常に大きい．不必要なノードまで配送木構築状態になることは，大きな電力の無駄といわざるをえない．さらに，ノードあたりの故障確率が等しいと仮定すると，ネットワークの規模が増大すると，全体で単位時間あたりの故障発生頻度が上がる．つまり，ネットワークの拡張性（スケーラビリティ）の問題を生じる．この問題を解決するためには，障害発生時に，近隣の葉ノードにもメッセージを伝達し，障害から一定範囲のノードを配送木構築状態にする手段が必要である．

4. 配送木の局所的再構築による長寿命化手法

4.1 概要

提案手法では，小島らの手法 [3] を拡張し，トポロジ変化時および残余電力の低下時に局所的に配送木を再構築する

ことで，従来と比べて大幅な長寿命化を実現する．配送木の再構築は，残余電力が一定値以下のノードが必ず葉ノードとなるように行う．つまり，再構築のたびに，残余電力が比較的大きいノードが順に中継ノードとなり，近隣ノードの電力を効率利用してネットワークを長寿命化する．全ノードの電力を均等に利用する経路制御による従来手法と比べると，提案手法は葉ノードのビーコンを停止し，中継ノード以外の電力消費を温存することで，各ノードの残余電力を順番に使用することを可能とし，ネットワークを長寿命化できる，なお，提案手法の配送木再構築は相応の電力を消費するため，残余電力が一定値を下回った場合のみに配送木を再構築することで，頻繁な配送木の再構築を防止する．

配送木の再構築処理は，必要最低限の局所領域内のノードのみを配送木構築状態に遷移させるように小島らの手法を拡張する．拡張に際しては，葉ノードがビーコンを送信しないため，他のノードが葉ノードに制御メッセージを送れないことが問題となる．図 4 に例を示す．図 4(a) は，配送木が構築されて全ノードが定常状態となった状態で，ノード D の故障によりリンク (E, D) が切れた場面である．提案手法では次ホップが変わるノード数が最小になるように局所的に配送木を修復することを目指しており，この例ではノード E, J ，および K が次ホップを変更して H に接続することで，3 ノードのみの変化で図 4(b) のように配送木が再構築できる（処理の便宜上，提案手法では L の次ホップも変更される）． H は J と K の次ホップに選択されたことを知り，中継ノードに変化する必要があるが， H はビーコンを送信しないため，中継ノードに変化するための制御メッセージを K から受信できないことが問題となる．

この問題を解決するために，提案手法では， J と K が H を「連絡ホップ」として選択しておき，定期的に Keep Alive フレームを送ることで，トポロジ変化時に J と K から H への制御メッセージの伝達を可能にする．提案手法では，多様なトポロジ変化に対して配送木の局所修復ができるように，すべての葉ノードが連絡ホップを設定する．

故障等によりトポロジが変化した場合には，変化箇所の子にあたる中継ノードを開始点として，配送木を修復でき

る連絡ホップでできるだけ故障個所に近いものを探索する。そのような連絡ホップが発見されると、できるだけ少ないノードが次ホップを変更し、配送木を修復する。図 4(a)では、リンク (E, D) が切断されると、探索の開始点である中継ノード E, その子である葉ノード K と L が配送木構築状態になり、配送木の修復を試みる。この場合には、E, K, L が次ホップを更新して配送木を修復できるため、それ以外のノードは配送木構築状態になることなく、配送木の修復が完了する。もしこの範囲で配送木が修復できなかった場合には、E の子孫の中継ノード (とその子である葉ノード) にも順次探索範囲を広げ、配送木の修復を試みる。

以下、4.2 節で残余電力低下時に配送木の再構築を開始する手法、4.3 節で連絡ホップの選択法、4.4 節でトポロジ変化時の配送木の修復法を、詳細に説明する。

4.2 残余電力に基づいた配送木再構築の開始

提案手法において、ノードの残余電力に基づいて配送木再構築を開始する手法を述べる。提案手法では、定常状態でネットワークを運用している間に、中継ノード n_x の残余電力が、あらかじめ設定した閾値 C_{change} を下回ると、以後送信するすべての送信フレームに、残余電力が低下していることを表すフラグを立てて送受信を行い、 n_x の次ホップおよび子ノードに n_x の残余電力が低下していることを伝達したのち、一定時間経過後に葉ノードとなる。これに合わせて、4.4 節で述べる配送木の再構築動作により、ノード n_x の周辺にあるノードにより局所的に配送木が再構築が開始される。

配送木の再構築により新たに選択する中継ノードは、残余電力があらかじめ設定した閾値 C_{slimit} よりも大きいノードを選択する。これにより、中継ノード以外のノードの電力を再構築時まで温存しつつ、周辺のノードの電力を順に使用することができる。なお、中継ノードに新たに選択できる最低残余電力量 C_{slimit} は $C_{slimit} > C_{change}$ となるように設定する。これは、残余電力が C_{change} をわずかに上回っているようなノードが新たに中継ノードとして選択されないようにすることで、消費電力量の大きい配送木の再構築動作が、同じ個所で連続して発生することを防止するためである。

中継ノードは、残余電力が C_{change} 以下になったときに葉ノードとなることで、ノード寿命を大幅に延長することができる。図 5 を用いて説明する。図 5 はある中継ノード n の残余電力 $C(n)$ を縦軸、運用開始からの経過時間を横軸としたグラフである。時刻 $t = 0$ から時刻 $t = t_{change}$ までは、中継ノードとして動作している。中継ノードは定期的なビーコンの送信や子孫ノードから送信されたデータパケットの転送を行うため消費電力量が大きく、このまま運用を続けるとノード n は時刻 $t = t_{end1}$ で $C(n) = 0$ となる。そこで、残余電力 $C(n)$ が閾値 C_{change} を下回ると

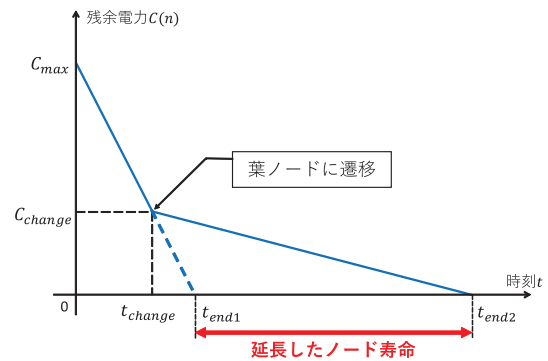


図 5 残余電力による葉ノードへの遷移
Fig. 5 Effects on lifetime by switching to leaf node.

ノード n は葉ノードとして動作するようにする。葉ノードは先述したように、他ノードのデータパケットを転送せず、定期的なビーコンの送信も停止することから、消費電力量が非常に小さくなる。これにより、本来 t_{end1} までであった寿命を t_{end2} まで延長させることができる。

4.3 配送木再構築の準備：連絡ホップの選択

0 定常状態時における配送木再構築の準備として、配送木の局所的再構築に用いる連絡ホップの選択方法を述べる。先述のように、提案手法では、すべての葉ノードが連絡ホップを設定することにより、できるだけ多様なトポロジ変化に対して局所修復を可能にする。ある葉ノード n_x が連絡ホップを選択する場合を考える。 n_x は、連絡ホップとして、配送木を修復できるノードを選択する必要がある。提案手法では、葉ノード n_x は、次ホップ $par(n_x)$ 、および次々ホップ $par(par(n_x))$ のいずれかが故障した場合にも配送木を修復できるような連絡ホップを配送木構築時に探索し、選択する。上記の条件を満たすためには、 n_x は自分の次々ホップの子孫 $D(par(par(n_x)))$ 以外のノードを連絡ホップに選択すればよい。図 4(a) の例では、ノード K は、J, E, または L を連絡ホップに選択すると、次々ホップ D または次ホップ E の故障時に配送木を修復できないが、 $D(par(par(n_x)))$ に含まれない H を連絡ホップとすれば、配送木の修復が可能になる。

連絡ホップによる制御メッセージの伝達は、連絡ホップに選択されたノードが中継ノードと同様に定期的にビーコンを送信することで行う。葉ノード n_x が葉ノード n_r を連絡ホップに選択したとすると、 n_x と n_r の両方が配送木構築状態である間に、 n_x が送信した制御メッセージを n_r が受信する。制御メッセージには n_x が選択した連絡ホップが含まれており、これを n_r が受信することで、 n_r は n_x の連絡ホップに選択されたことを知る。連絡ホップに選択されると、 n_r は、配送木における位置は葉ノードだが中継ノードと同様に定期的にビーコンを送信することで他のノードからのフレームを受信することができる「準中継ノード」となる。葉ノードである n_x は、定常状態になる

と制御メッセージを送信しなくなるが、 n_r が送信したビーコンに対して定期的に連絡ホップ維持のための最小限の情報を持った擬似データフレーム (Keep Alive フレーム) を返信する。 n_r は Keep Alive フレームを 1 つ以上のノードから受信できている間は準中継ノードであり続け、Keep Alive フレームの受信が途切れると、 n_x が連絡ホップを変えたと判断して葉ノードに戻る。なお、準中継ノードは葉ノードと同様に連絡ホップを選択することとする。すべての葉ノードおよび準中継ノードは、 n_x と同様に連絡ホップを選択し、連絡ホップに制御メッセージを送信できる状態を維持する。

準中継ノードは他ノードから送信されたデータの転送は行わないが、定期的にビーコンを送信するため、中継ノードと同等の電力を消費する。したがって、ネットワーク全体の省電力化を目指すためには、その数をできるだけ少なく抑えることが望ましい。提案手法では、多くの葉ノードができるだけ共通のノードを連絡ホップに選択することで、準中継ノードの数を低減させる。このために、3.5 節で述べた次ホップの選択法と同じ戦略に基づいて、他のノードからできるだけ多く連絡ホップとして選択されているノードを、連絡ホップとして選択する。具体的には、提案手法では、制御メッセージに、2 つのフィールド「連絡ホップ」と「連絡ホップ被選択数」を追加する。「連絡ホップ」フィールドにより、各ノードは自分を連絡ホップとして選んでいるノードを知り、その数を連絡ホップ被選択数として制御メッセージに含めて送信する。各葉ノードおよび準中継ノードは、隣接ノードの中に $D(\text{par}(\text{par}(n_x)))$ に含まれない中継ノードがなければ (中継ノードに対して他のノードから制御メッセージを送ることは可能なので、あれば連絡ホップを設定する必要がない)、 $D(\text{par}(\text{par}(n_x)))$ に含まれない葉ノードもしくは準中継ノードの中で、連絡ホップ被選択数が最大のノードを、自分の連絡ホップとして選択する。上記の処理により、すべての葉ノードは、できるだけ準中継ノードの数が少なくなるように、配送木の修復が可能な連絡ホップを選択する。

4.4 配送木の再構築

ノード故障発生時や、残余電力の減少にともなう中継ノードの葉ノードへの遷移にともなうトポロジ変化時には、連絡ホップを用いて局所的に配送木を再構築する。できるだけ少数のノードが配送木構築状態となって再構築を完了するために、配送木構築状態となるノードの範囲が少しずつ拡大するように制御する。

各ノード n は、自分の次ホップからのビーコンを一定時間受信できなければ、トポロジ変化により次ホップへの到達性が失われたと判断し、配送木構築状態に遷移する。また、中継ノードの残余電力が閾値を下回った場合にも、その子ノードが次ホップへの到達性が失われたと判断し、配

送木構築状態に遷移する。残余電力の減少を子ノードに知らせる処理は、その中継ノードが葉ノードに遷移するまでの一定時間に送信するすべてのフレームに特定のフラグを立てることで行う。次ホップへの到達性が失われたノードは、シンクに到達する経路も失うため、シンクからの距離 (ホップ数) $level(n)$ を無限大 (∞) で初期化する。配送木構築状態に遷移して、さらに $level(n)$ が ∞ になると、以後送信するフレームに「トポロジ変化フラグ」を立て、中継ノードの場合はその子ノードに周知する。子ノードは、次ホップ $\text{par}(n)$ のトポロジ変化フラグが立っていることを検知すると配送木構築状態に遷移する。その後、次ホップ $\text{par}(n)$ から送信された制御メッセージ受信時に、次ホップが持つ $level(\text{par}(n))$ が ∞ であれば、自身の持つ $level(n)$ も ∞ に更新する。このようにして、トポロジ変更を検出したノードの子孫が順次、配送木構築状態に遷移し、配送木構築状態であるノードの範囲が拡大する。

一方、配送木構築状態に遷移したノード n_x が、シンクからの距離が ∞ でない隣接ノード n_e (以後、出口ノードと呼ぶ) を発見すると、出口ノード n_e の $level(n_e)$ に 1 加算した値をノード n_x のシンクからの距離 $level(n_x)$ に設定する。中継ノードと準中継ノードが送信するビーコンにはシンクからの距離が含まれており、この値を通じてシンクからの距離が ∞ でないノードを発見できる。出口ノードが連絡ホップであれば、出口ノード n_e を次ホップ $\text{par}(n_x)$ として選択して、次ホップ ID を含めたメッセージを出口ノード n_e に送信する。出口ノード n_e は n_x から受信したメッセージにより n_x の次ホップとして選択されていることを知り、中継ノードとなる (n_e が中継ノードであれば、何もしなくてよい)。その後、フレームの交換によって順次シンクからの距離が更新され、出口ノードから到達可能なノードはすべてシンクからの距離が ∞ でない値に更新されることで、次ホップが決定される。配送木構築状態になったノードは、シンクからのホップ数に ∞ でない値が設定されてから一定時間後に定常状態に遷移する。このため、最終的には全ノードが定常状態に遷移し、配送木の再構築が完了する。

ここで、トポロジ変化を検出したノードの子孫が配送木構築状態になる拡大速度に比べて、出口ノードからの経路情報が伝播する速度が十分に速くなければ、不必要に多くのノードが配送木構築状態になり、電力を浪費してしまう。これを防ぐために、提案手法では、中継ノードは、次ホップのシンクからの距離が ∞ であることを検出してから一定時間 T 以後に、はじめてフレームにトポロジ変化フラグを立てて送信する (つまり、時間 T が経過するまでに次ホップのシンクノードからのホップ数が ∞ でなくなれば、各フレームにフラグを立てて送信しない)。この遅延 T により、配送木構築状態のノードが拡大する速度を低減させ、できるだけ少数のノードのみが配送木構築状態になること

で配送木の再構築を実現する。

図 4(a) の例では、D の故障を E が検出すると、E, L, K が配送木構築状態となり、同時に、E, L, K のシンクからの距離が ∞ となる。その後、K が出口ノード H を発見し、制御メッセージによりこの情報が伝播することで、E, L, K のシンクからの距離が (H 経由のシンクからの距離に) 設定され、再構築が完了する。もし、連絡ホップ (K, H) が存在しないと仮定すれば、E, L, K のシンクからの距離は ∞ のままであるが、この場合には、時間 T が経過すると、F と M が配送木構築状態となる。その後は、M が出口ノード I を発見し、その情報が伝播することで、配送木構築状態になった全ノード E, L, K, J, M のシンクからの距離が I を経由したものに更新される。

なお、小島らの手法では、次ホップのシンクからの距離が変更された場合にはトポロジ変化が発生したと判断して配送木構築状態に遷移する。提案手法では、配送木構築状態に遷移するノード数を抑えるため、定常状態の次ホップのシンクからの距離が変更された場合は、配送木構築状態になることなくシンクからの距離を更新することとする。

5. 評価

5.1 評価方針

提案手法は、受信ノード主導型 MAC プロトコル RI-MAC からビーコン送信を省略し、そのために生じる配送木構築時の問題を経路制御プロトコルにより補うことで、ネットワーク寿命を延長させる。受信ノード主導型 MAC プロトコルと経路制御の組合せによりネットワーク寿命を延ばす提案は新規であるため、従来の MAC プロトコル (RI-MAC) が動作し、経路制御のみにより寿命を延長する手法と比較することにより、提案手法の効果を評価する。

具体的には、提案手法を自作シミュレータに実装し、消費電力を積算することで性能を比較する。シミュレータは、MAC 層とネットワーク層の動作を模倣して電力を積算するイベント駆動型のシミュレータとして C++ 言語により実装した。物理層モデルとしては、ノード間の距離が一定以内であれば通信が成功する Single Disk Model [12] を用いた。センサネットワークにおいては通信速度が比較的低いため、Single Disk Model は妥当性が高いと考えられる。また、送受信電力、待機電力、スリープ電力等のパラメータについては、最新のセンサ端末の詳細な調査に基づき、現在販売されているチップで実現できる現実的な性能を想定して定めた。

5.2 評価シナリオ

正方形フィールドにセンサをランダム配置するシナリオにより、シミュレーション評価を行う。500 [m] × 500 [m] のフィールド上にノードを図 6 のようにランダムに n 個配置し、シンクノードをフィールドの中央に設置する (図 6

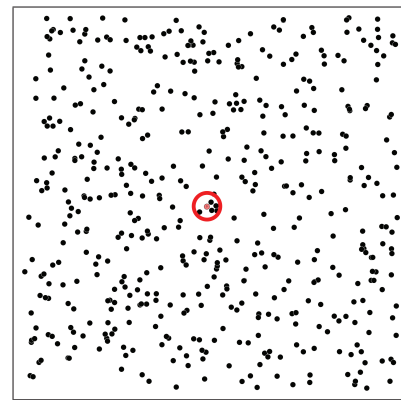


図 6 ノード配置例 ($n = 500$)

Fig. 6 Example of node layout for simulation ($n = 500$).

表 1 シミュレーションパラメータ

Table 1 Simulation parameters.

変数	意味	値
C_{batt}	バッテリー容量	2,500 [mAh]
V	動作電力	3.0 [V]
b	ビーコン送信間隔	30 [秒]
p	制御メッセージ送信間隔	30 [秒]
r	センシング間隔	1,800 [秒]
l_{data}	データフレームサイズ	61 [Bytes]
l_{ack}	Ack フレームサイズ	31 [Bytes]
l_{beacon}	ビーコンサイズ	93 [Bytes]
$l_{control}$	制御メッセージサイズ	93 [Bytes]
t_{txwait}	送信時のビーコン待受時間	0.1 [秒]
$t_{backoff}$	最大バックオフ時間	2.56 [ミリ秒]
n	構成ノード数	250, 500, 1,000 [個]
C_{stimit}	中継ノードとして選択可能な最低残余電力	800 [mAh]
C_{change}	中継ノードとして動作可能な最低残余電力	200 [mAh]

中央赤丸内のノード)。各ノードの通信可能範囲は半径 100 [m] の円内とする。各ノードは一定時間ごとにセンサによる測定を行い、それらの値をシンクに集める。シミュレーションパラメータを表 1 に示す。各パラメータは本手法が想定するセンサネットワークの典型例として決定した。最大バックオフ時間等の通信プロトコルのパラメータは、IEEE802.15.4 の値を用いた。送信時のビーコン待受時間は、センサ端末に一般的に用いられる RTC モジュールの誤差 (約 1 分/1 カ月) をもとに算出した。シミュレーションでは、初期の配送木構築が完了し全ノードが定常動作を開始してから、ネットワーク寿命に達するまでの消費電力を計算した。各ノードの MAC および経路制御プロトコルの動作を模倣し、その過程で生じる各動作の時間や回数から消費電力を積算する。消費電力の計算に用いる電力モデルは 5.4 節で述べる。

比較手法としては、受信ノード主導型 MAC プロトコルである RI-MAC との比較をベースラインとする。しかし、

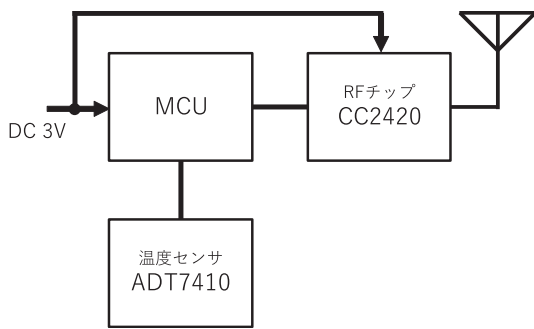


図 7 センサノードブロック図
Fig. 7 Block diagram of sensor node.

受信ノード主導型 MAC プロトコル上で動作する従来手法は存在しないことから、経路制御のみで均等に電力を消費する、比較的単純に動作する手法を設計した。具体的には、各ノードは、RI-MAC に準じて定期的にビーコンを周囲のノードに送信し、ビーコンを送信するたびに、シンクノードからの最短ホップ数が 1 小さい隣接ノード集合から、ランダムに 1 つを次ホップに選択する。次ホップをランダム選択することで、ランダム性に基づいた均等な電力消費が期待できる。

評価指標として、定常状態として動作を開始してから計測したネットワーク寿命を用いる。ネットワーク寿命は、最初に電池残量が枯渇したノードが発生するまでの時間と、最初にシンクノードまでの経路が確保できないノードが発生し、配送木の再構築による修復が不可能になる（ネットワークが分断される）までの時間のうち、短い方の値を用いる。また、シミュレーションは構成ノード数 n ごとに 5 回ずつ実施し、平均値を用いる。

5.3 センサ端末の構成モデルとパラメータ値

近年、多くのセンサ端末が開発、販売されているが、その多くは特定の RF チップとマイクロコントローラ (MCU) を用いていることが多く、消費電力はこれらのチップに支配される。本節では、センサ端末とそれらに用いられるチップを概観し、シミュレーションで想定する最新のセンサ端末の性能を導く。

近年のセンサ端末のリストは、たとえば文献 [13] 等で参照できる。IEEE802.15.4 に準拠したセンサ端末は、非常に多くの場合、RF チップとして Texas Instruments 社の Chipcon CC2420 [14] を用いている。また、マイクロコントローラ (MCU) としては、Texas Instruments 社の MSP430F1611 [15], MSP430F2617 [16], Microchip 社の Atmel ATmega1281 [17] が多く用いられている。このことから、本評価では、図 7 のように MCU と RF チップ、そしてセンシングデータの生成にかかる電力を考慮するための汎用温度センサ ADT7410 [18] を組み合わせたセンサ端末モデルを想定する。

先述の主要な MCU の概要を述べる。また、表 2, 表 3,

表 2 CC2420 消費電力諸元

Table 2 CC2420 specifications on power consumption.

操作	時間 [秒]	電流 [mA]
データ送信 (1 byte)	t_{txb} 416×10^{-6}	I_{txb} 17.4
データ受信 (1 byte)	t_{rxb} 416×10^{-6}	I_{rxb} 19.7
起動	t_{Rwake} 1.35×10^{-3}	I_{Rwake} 0.426
受信待機	-	I_{Rwait} 0.426
スリープ	-	I_{Rsleep} 0.02

表 3 MSP430F1611 消費電力諸元

Table 3 MSP430F1611 specifications on power consumption.

状態	時間 [秒]	電流 [mA]
動作中	-	$I_{Mactive}$ 6.024
スリープ	-	I_{Msleep} 4.29×10^{-3}
起動	t_{Mwake} 6.0×10^{-6}	I_{Mwake} 6.024

表 4 MSP430F2617 消費電力諸元

Table 4 MSP430F2617 specifications on power consumption.

状態	時間 [秒]	電流 [mA]
動作中	-	$I_{Mactive}$ 4.12
スリープ	-	I_{Msleep} 1.10×10^{-3}
起動	t_{Mwake} 1.0×10^{-6}	I_{Mwake} 4.12

表 5 ATmega1281 消費電力諸元

Table 5 ATmega1281 specifications on power consumption.

状態	時間 [秒]	電流 [mA]
動作中	-	$I_{Mactive}$ 6.4
スリープ	-	I_{Msleep} 5.0×10^{-3}
起動	t_{Mwake} 5.0×10^{-5}	I_{Mwake} 6.4

表 6 ADT7410 消費電力諸元

Table 6 ADT7410 specifications on power consumption.

状態	時間 [秒]	電流 [mA]
センシング	t_{sense} 2.4×10^{-1}	I_{sense} 2.1×10^{-1}

表 4, 表 5, 表 6 に、シミュレーションに用いる消費電力諸元を示す。

MSP430F1611 は、Texas Instruments 社が供給する超低消費電力の 16 ビット MCU で、1.8~3.6 [V] で駆動し、1 [MHz], 2.2 [V] 駆動時の動作電力が 300 [μA], スリープ電力が 1.1 [μA], 電源オフ状態の電力が 0.2 [μA] である。なお、電源オフ状態では RAM 内容を保持できるが、外部からの入力をトリガとする起動のみに限定されるため、内蔵タイマにより復帰することはできない。また、スリープ状態からは 6 [ミリ秒] 以内に復帰できるとされている。MSP430F1611 と CC2420 を組み合わせたセンサ端末の例として、MEMSIC 社の Tmote TelosB [19] があげられる。

MSP430F2617 も、Texas Instruments 社が供給する超低消費電力の 16 ビット MCU で、1.8~3.6 [V] で駆動し、1 [MHz], 2.2 [V] 駆動時の動作電力が 365 [μA], スリープ

電力が 0.5 [μ A], 電源オフ状態の電力が 0.1 [μ A] とされている。スリープ状態からは 1 [ミリ秒] 以内に復帰できる。MSP430F1611 の後継チップであり、スリープ電力やスリープからの復帰時間が MSP430F1611 に比べ低減されている。MSP430F2617 と CC2420 を組み合わせたセンサ端末の例として、Zolertia 社が開発している Z1 [20] があげられる。

Atmel ATmega1281 は Microchip 社が供給する低消費電力の 8 ビット MCU で、2.7~5.5 [V] で駆動し、8 [MHz], 5.0 [V] 駆動時の動作電力が 10 [mA], スリープ電力が 5 [μ A] とされている。スリープ状態からは 50 [ミリ秒] 以内に復帰できる。Atmega1281 と CC2420 を組み合わせたセンサ端末の例として、カーネギーメロン大学が開発した FireFly [21] があげられる。

本論文では、これらの MCU と RF チップを組み合わせた場合の電力パラメータを用いて、消費電力を推定する。これにより、最新のセンサ端末の性能を反映した現実的なシミュレーションを行うことができる。

5.4 消費電力モデル

消費電力モデルを次式 (1) に示す。

$$E = E_{rx} + E_{tx} + E_{wait} + E_{wake} + E_{sleep} + E_{sense} \quad (1)$$

E は消費電力量である。 E_{rx} は受信電力, E_{tx} は送信電力, E_{wait} は受信待受電力, E_{wake} はスリープからの復帰電力, E_{sleep} はスリープに必要な電力, E_{sense} はセンシングデータ生成に必要な電力である。

データフレームのサイズを l_{data} , 制御メッセージのサイズを $l_{control}$, ACK のサイズを l_{ack} としたとき、各値は以下のように計算される。

E_{tx} : 送信電力はデータフレームの送信と制御メッセージの送信, ACK フレームの送信にかかる電力の合計である。データフレームの送信にかかる電力は $Vl_{data}t_{txb}(I_{txb} + I_{Mactive})$ であり、制御メッセージの送信にかかる電力は $Vl_{control}t_{txb}(I_{txb} + I_{Mactive})$, ACK フレームの送信にかかる電力は $Vl_{ack}t_{txb}(I_{txb} + I_{Mactive})$ であるから、送信電力は次式 (2) となる。

$$\begin{aligned} E_{tx} = & NUM_{Dtx}Vl_{data}t_{txb}(I_{txb} + I_{Mactive}) \\ & + NUM_{Ctx}Vl_{control}t_{txb}(I_{txb} + I_{Mactive}) \\ & + NUM_{Atx}Vl_{ack}t_{txb}(I_{txb} + I_{Mactive}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 NUM_{Dtx} はデータフレームの送信回数, NUM_{Ctx} は制御フレームの送信回数, NUM_{Atx} は Ack フレームの送信回数である。

E_{rx} : 受信電力も送信電力と同様にデータフレームの受信と制御メッセージの受信, ACK フレームの受信にかかる電力の合計である。データフレームの受信にかかる電力は $Vl_{data}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{Mactive})$ であり、制御メッセージの受信にかかる電力は $Vl_{control}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{Mactive})$, ACK フ

レームの受信にかかる電力は $Vl_{ack}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{Mactive})$ であるから、受信電力は次式 (3) となる。

$$\begin{aligned} E_{rx} = & NUM_{Drx}Vl_{data}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{Mactive}) \\ & + NUM_{Crx}Vl_{control}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{Mactive}) \\ & + NUM_{Arx}Vl_{ack}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{Mactive}) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 NUM_{Drx} はデータフレームの受信回数, NUM_{Crx} は制御フレームの受信回数, NUM_{Arx} は Ack フレームの受信回数である。

E_{wait} : 受信待機時間が t_{wait} であるとき、受信待機における消費電力は $E_{wait} = Vt_{wait}(I_{Rwait} + I_{Mactive})$ となる。

E_{wake} : スリープからの復帰電力は、MCU と RF チップの起動電力を合計したものである。よって、スリープからの復帰における消費電力は $E_{wake} = V(t_{Rwake}I_{Rwake} + t_{Mwake}I_{Mwake})NUM_{wake}$ となる。

E_{sleep} : スリープ時間が t_{sleep} であるときの消費電力は $E_{sleep} = Vt_{sleep}(I_{Msleep} + I_{Rsleep})$ となる。ここで、 I_{Msleep} はスリープ時電流, I_{Rsleep} は通信チップの受信電流,

E_{sense} : センシングデータ生成における消費電力は $E_{sense} = Vt_{sense}(I_{sense} + I_{Mactive})$ となる。

以上のようにして計算された消費電力量 E を各ノードごとに積算することにより、ノードごとの電池残量をシミュレーションする。つまり、シミュレーションにおいては、データフレームの送信回数 (NUM_{Dtx}), データフレームの受信回数 (NUM_{Drx}), 制御フレームの送信回数 (NUM_{Ctx}), 制御フレームの受信回数 (NUM_{Crx}), ACK の送信回数 (NUM_{Atx}), ACK の受信回数 (NUM_{Arx}), センシング回数 (NUM_{sense}), スリープからの復帰回数 (NUM_{wake}), スリープ時間 (t_{sleep}), 受信待機時間 (t_{wait}) の各値を観測・積算し、上記消費電力モデル式にあてはめることで、消費電力を計算する。なお、本評価では電池電圧の降下を補うレギュレータにおける電力損失やチップ間通信における電力損失は考慮しないものとする。

5.5 評価結果

表 7 に、シミュレーションの結果求められた、それぞれの構成ノード数 n において、提案手法において定常状態として運用を開始してからネットワーク寿命に達した時刻、比較手法においてネットワーク寿命に達した時刻を示す。また、表 7 の結果を横軸を構成ノード数、縦軸を発生時刻として示したグラフを図 8 に示す。

表 7, 図 8 のシミュレーション結果より、すべてのハードウェア構成および構成ノード数 n において、提案手法が比較手法に対してネットワーク寿命を延長できていることが確認された。 $n = 250, 500$ の場合にはネットワーク寿命を約 1 年以上延長し、特に MSP430F2617 の構成ノード数 $n = 1,000$ では、ネットワーク寿命を約 3 年延長することができていることが確認できた。

表 7 シミュレーション結果

Table 7 Comparing lifetime of proposed method.

	構成ノード数 n		
	250	500	1,000
MSP430F1611 提案手法	6.194	5.854	5.394
MSP430F1611 比較手法	4.959	4.508	3.002
MSP430F2617 提案手法	7.439	6.817	6.270
MSP430F2617 比較手法	6.424	5.565	3.396
ATmega1281 提案手法	5.839	5.446	5.568
ATmega1281 比較手法	4.441	4.572	2.967

(単位：年)

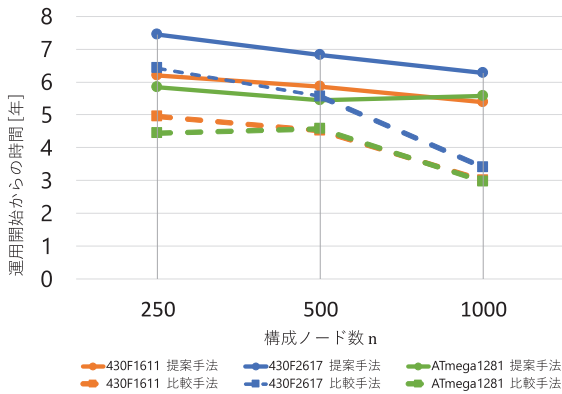


図 8 シミュレーション結果

Fig. 8 Comparing lifetime of proposed method.

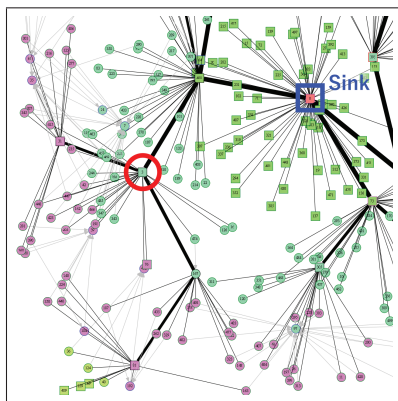


図 9 再構築前の配送木の一例 ($n = 500$)

Fig. 9 Example of delivery-tree before reconstruction.

なお、構成ノード数が増えるに従って、提案手法および既存手法ともにネットワーク寿命が短くなっているが、これは構成ノード数増加にともなって各ノードがシンクノードに向けて転送すべきパケット数が増大したため、消費電力量が大きくなったことが原因であると考えられる。しかしながら、既存手法では構成ノード数の増加にともない性能が顕著に下がっているのに対して、提案手法ではいずれの構成ノード数においても性能の低下を抑えることができる。

次に、提案手法による配送木の再構築の例を示す。図 9 は再構築前の配送木 ($n = 500$) の一部、図 10 は再構築後

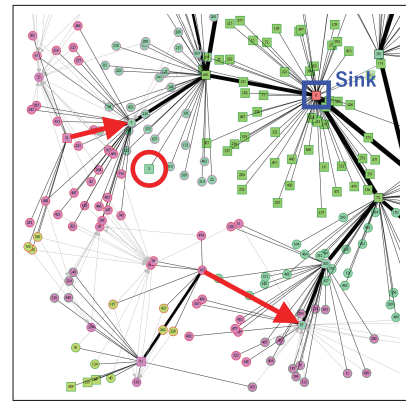


図 10 再構築後の配送木の一例 ($n = 500$)

Fig. 10 Example of delivery-tree after reconstruction.

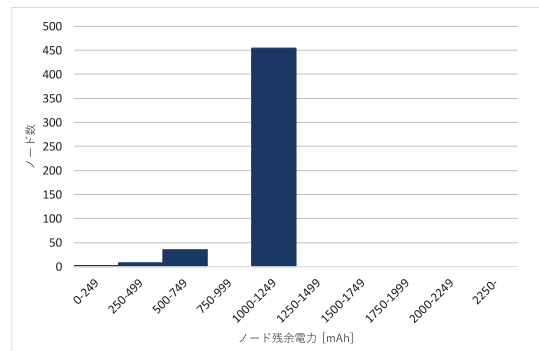


図 11 提案手法ネットワーク寿命到達時のノード残余電力 ($n = 500$)

Fig. 11 Residual battery power of proposed method when lifetime ends ($n = 500$).

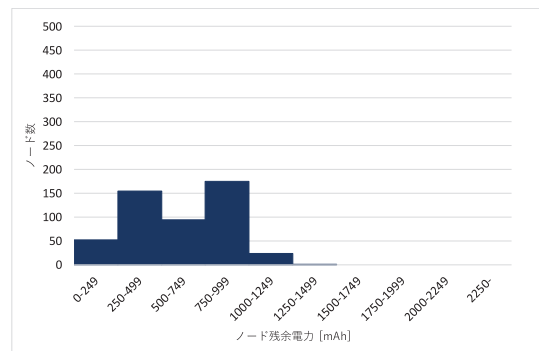


図 12 比較手法ネットワーク寿命到達時のノード残余電力 ($n = 500$)

Fig. 12 Residual battery power of RI-MAC when lifetime ends ($n = 500$).

の配送木の一部である。図中右上に青色四角で示したノードがシンクノードであり、図の左下に位置するノードからシンクノードへ向けてパケットが送信される。なお、同じ色で塗りつぶされたノードはシンクノードからの最短ホップ数が同じノードであることを示している。図 9 の赤丸で示した中継ノードの残余電力が低下したため葉ノードへの遷移が発生したことから、配送木の局所的な再構築が開始され、再構築の結果、図 10 の赤矢印で示すように異なる

ノードを中継ノードとして選択していることが確認できる。

また、図 11 および図 12 に MSP430F2617 の $n = 500$ において、ネットワーク寿命到達時のノード残余電力をヒストグラムで表した図を示す。図より、提案手法ではノードの大多数が 1,000 [mAh] 以上の残余電力があるのに対して、比較手法では残余電力が平均的に低くなっている。

6. おわりに

本研究では、受信ノード主導型 MAC プロトコルを拡張し、配送木における葉ノードのビーコン送信を省略することで、センサネットワークの寿命を大幅に延伸する手法を提案した。葉ノードのビーコン送信を省略することで、ノード故障等のトポロジ変化時に配送木を再構築することが困難になるという問題があるが、提案手法ではこれを、連絡ホップを用いた経路制御手法を組み合わせることで解決している。また、配送木を構成するノードの残余電力が低下した場合に配送木を動的に再構築し、残余電力が低下したノードを消費電力が低い葉ノードにすることにより、ネットワーク全体の寿命を延伸する仕組みを組み入れた。

最新センサ端末のハードウェア構成を考慮した消費電力モデルを用いて評価を行った結果、提案手法により、ネットワークの寿命を年単位で延伸できることを示した。近年のセンサ端末では通信速度が 256 Kbps と高速になっており、データ送受信自体の消費電力は大きくないが、ビーコンにともなう受信待機時間の影響が大きいいため、結果としてビーコンの削減は葉ノードの消費電力の大幅な削減につながる事が明らかとなった。また、温存した葉ノードの電力を、中継ノードとして交代で使用することにより、ネットワーク全体として電力を効率良く利用でき、ネットワークの寿命延伸に貢献できることを示した。今後は、センサノードや電波状況の多様性を考慮した評価により、提案手法の安定性を調べる事が重要であると考えている。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 15H02691 の助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 阪田史郎, 戸辺義人, 南 正輝, 猿渡俊介, 鈴木 誠, 石原 進, 若宮直紀, 鈴木 敬, 西山裕之, 福永 茂, 河野隆二: 3 章 センサネットワーク, 電子情報通信学会「知識ベース」4 群-5 編 (2010).
- [2] IEEE Computer Society: IEEE Std 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (2003).
- [3] 小島祥平, 吉廣卓哉: 受信ノード主導型 MAC プロトコルに基づいた管理コストが低い無線センサネットワーク, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.2, pp.471–479 (2016).
- [4] Zhang, X. and Wu, Z.D.: The balance of routing energy consumption in wireless sensor networks, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol.71, No.7,

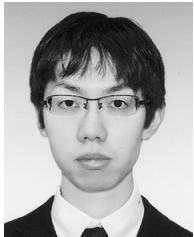
- pp.1024–1033 (2011).
- [5] Li, X.H., Fang, K.L., Chen, H.P. and Ho, H.S.: Energy-balance routing for wireless sensor networks with scale-free characteristic, *Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC)* (2012).
- [6] Sum, Y., Gurewits, O. and Johnson, D.B.: RI-MAC: A Receiver-initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks, *Proc. SenSys '08*, pp.1–14 (2008).
- [7] Polastre, J., Hill, J. and Culler, D.: Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, *Proc. SenSys '04*, pp.95–107 (2004).
- [8] Buettner, M., Yee, G., Anderson, E. and Han, R.: X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks, *Proc. SenSys '06* (2006).
- [9] Huang, P., Wang, C. and Xiao, L.: RC-MAC: A Receiver-Centric MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks, *Proc. IWQoS '10* (2010).
- [10] Luo, D., Zhu, X., Wu, X. and Chen, G.: Maximizing Lifetime for the Shortest Aggregation Tree in Wireless Sensor Networks, *Proc. INFOCOM '11* (2011).
- [11] Kuo, T.W. and Tsai, M.J.: On the Construction of Data Aggregation Tree with Minimum Energy Cost in Wireless Sensor Networks: NP-Completeness and Approximation Algorithms, *Proc. INFOCOM '12* (2012).
- [12] Gupta, P. and Kumar, P.: The Capacity of Wireless Networks, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.46, No.2, pp.388–404 (2000).
- [13] List of Wireless Sensor Nodes (Wikipedia), available from https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_wireless_sensor_nodes (accessed 2017-05-08).
- [14] Texas Instruments Inc.: CC2420 Data Sheet, available from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf> (accessed 2017-05-01).
- [15] Texas Instruments Inc.: MSP430F1611 Data Sheet, available from <http://www.ti.com/lit/ds/slas368g/slas368g.pdf> (accessed 2017-05-01).
- [16] Texas Instruments Inc.: MSP430F2617 Data Sheet, available from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2617.pdf> (accessed 2017-05-01).
- [17] Microchip Technology Inc.: ATmega1281, available from <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega1281> (accessed 2017-05-01).
- [18] Analog Devices Inc.: ADT7410 Data Sheet, available from <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADT7410.pdf> (accessed 2017-05-01).
- [19] MEMSIC Inc: TelosB Data Sheet, available from <http://www.memsic.com/userfiles/files/DataSheets/WSN/telosb.datasheet.pdf> (accessed 2016-01-26).
- [20] Zolertia Inc.: Z1, available from <http://zolertia.io/z1> (accessed 2017-05-01).
- [21] Carnegie Mellon University: FireFly Real-Time Sensor Networks, available from <https://www.ece.cmu.edu/firefly/> (accessed 2017-05-01).

推薦文

本論文では、無線センサネットワークにおいて、配送木においてバッテリーを大きく消費する中継ノードの残余電力が一定値未満になった時点で局所的に配送木を再構築することで、近隣ノードの電力を効率的に利用し、ネットワークの寿命を延ばす手法を提案している。電源のない場所に

センサ端末を設置して無線マルチホップ通信によりセンシングデータを集める無線センサネットワークは、IoTを実現するための重要技術の1つとして最近特に注目を集めており、高い有用性を有する研究であるといえる。よって、本論文を情報処理学会論文誌に推薦する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 重野 寛)



横谷 晟人 (学生会員)

1993年生。2016年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科卒業。2017年現在、和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程在学中。無線センサネットワークにおけるルーティングと省電力化に関する研究に従事。

電子情報通信学会学生会員。



吉廣 卓哉 (正会員)

1975年生。1998年京都大学工学部卒業。2000年同大学大学院情報学研究科博士前期課程修了。2003年同研究科博士後期課程修了。博士(情報学)。2003年和歌山大学システム工学部助教。2009年同学部講師，2012年准教授。

グラフ理論，インターネットルーティング，無線アドホックネットワーク，バイオインフォマティクス，データベースシステム等の研究に従事。電子情報通信学会，日本データベース学会，IEEE各会員。本会シニア会員。