

推薦論文

# 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

小島 祥平<sup>1</sup> 吉廣 卓哉<sup>2,a)</sup>

受付日 2015年5月7日, 採録日 2015年11月5日

**概要:** 無線センサネットワークが社会を支えるネットワークとして動作するためには、敷設されたセンサネットワークを10年以上の長期にわたって維持・運用することが望ましい。このため、省電力な無線センサネットワークを実現するMACプロトコルや経路制御方式の研究が数多く見られる。しかし、標準的な乾電池やボタン電池で動作する限りでは、10年以上の長い動作寿命を実現することは到底不可能である。したがって、現実的には、定期的にバッテリーを交換する等の管理コストが必要になるが、バッテリー交換にともなう管理コストを現実的な水準まで低減させることが求められる。本論文では、受信ノード主導型の低消費電力なMACプロトコルであるRC-MACを拡張することで、10年以上の長期運用を比較的低い管理コストで実現するセンサネットワーク実現技術を提案する。提案手法では、データ配送木の葉ノードは受信処理が不要であることを利用して、葉ノードの寿命を10年以上に延ばすRC-MACの拡張を提案する。また、このMACプロトコルと組み合わせることで効率良く配送木を構築する経路制御プロトコルも提案し、バッテリー交換を要する中継ノード数が少ない配送木を自律的に構築する。提案手法により、バッテリー交換コストを低減させた長期運用に耐える現実的な無線センサネットワークを実現する。

**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, 管理・運用コスト

## A Low Management Cost Wireless Sensor Network Based on Receiver Initiated MAC Protocols

SHOUHEI KOJIMA<sup>1</sup> TAKUYA YOSHIHIRO<sup>2,a)</sup>

Received: May 7, 2015, Accepted: November 5, 2015

**Abstract:** To make wireless sensor networks (WSNs) work effectively as a social infrastructure in our life, it is desirable that WSNs built once work more than 10-years long with practical maintenance cost. However, current WSN technology cannot achieve it as long as each sensor node is driven by a general AA or a lithium button battery. Thus, we need to replace batteries periodically, where it is expected to reduce the replacing cost to a practical level. In this paper, we improve a receiver initiated MAC protocol called RC-MAC to make possible to maintain a sensor network for 10-years long with practical cost. In the proposed method, based on the discovery that leaf nodes in the delivery tree require to receive no data frame, we extend RC-MAC to prolong the lifetime of the leaf nodes to more than 10 years. Also, we propose a routing protocol that works in combination with our MAC protocol to autonomously construct a data delivery tree such that the number of relay nodes is as small as possible.

**Keywords:** wireless sensor networks, MAC protocols, routing protocols, management cost

<sup>1</sup> 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

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

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

### 1. はじめに

近年、無線通信技術の高性能化やCPUの小型化また低価格化が進んでいる。これにより無線通信機能を持った小型センサを用いてネットワークを構成して、各センサに

よって得られたデータを無線マルチホップ通信により収集する WSN (Wireless Sensor Network) の研究が進められている。WSN では、他の無線マルチホップネットワークにはない特徴がある。まず、ネットワークの通信スループットは低くてもよい一方で、データ収集の信頼性は向上させたいという要求がある。また、各センサノードは必ずしも電源に接続できず、多くの場合にバッテリー駆動が前提となる。センサノードをバッテリー駆動にすることで、センサの設置場所を選ばないセンサの配置が可能となるが、その一方で、通信あるいはデータ処理に要する消費電力を低く抑えた長寿命なネットワークの実現が求められる。

無線センサネットワークを実用化するために、近年では、IEEE802.15.4 [20] 等の通信方式が開発されてきた。これらの通信規格では、低消費電力な動作により、バッテリー駆動のノードでも長期間にわたり動作が可能になるように設計されている。しかし、センサネットワークが社会を支えるネットワークとして動作するためには、10 年以上の安定した継続運用が望ましく、一方で現在の通信規格では、一般的な乾電池やボタン電池による 10 年の長い動作寿命の実現は難しい。このため、長期の運用を考えると、定期的にバッテリーを交換する等の管理コストが必要であり、さらなる低消費電力化により、管理コストの低減が望まれる。

実用的な無線センサネットワークの実現に向けた省電力なセンサネットワーク技術の研究は数多く行われている。最も有効な方法の 1 つに、MAC プロトコルの省電力化がある [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]。これらは、低いスループットでよいセンサネットワークにおいて、受信可能状態で待機する代わりに定期的にスリープすることで、待機電力を削減してセンサノードの消費電力を削減する。これらの MAC プロトコルには、送信ノード主導型と受信ノード主導型の 2 種類があり、一般には、RC-MAC [6] 等の受信ノード主導型 MAC プロトコルの方が消費電力の点では優れている。しかし、これらはブロードキャスト送信をサポートしないため、シンクノードまでデータを送信するための配送木 (配送経路) を構築するためには工夫が必要である。

そこで本論文では、RC-MAC を拡張した新たな低消費電力 MAC プロトコルと、この上位層で自律的に配送木を構築する経路制御プロトコルを提案することで、低い管理コストで長期運用可能な現実的なセンサネットワークの実現を目指す。具体的には、提案手法では、RC-MAC を拡張して動作状態を導入することで、効率的な配送木の構築と、低消費電力なデータ送信を両立させる。「配送木構築状態」ではブロードキャストを可能にすることで効率的に配送木を構築し、「定常状態」では RC-MAC に基づいた消費電力の低い効率的なデータ集約を実現する。定常状態においては、葉ノードはデータフレームの受信が不要であることから、さらに消費電力を抑えて 10 年以上の長いノード寿命を実現する。複数の状態をシームレスに遷移させる

ことで、RC-MAC による効率的なデータ通信性能を維持したままで、ノード故障等によるトポロジ変化時にも自律的に配送木を再構築できる。また、配送木の構築においては、バッテリー交換が必要な中継ノード数を低く抑えることで、管理コストの低いセンサネットワークを実現する。提案手法により、10 年以上にわたって、比較的少数のバッテリーを年に 1 度程度の頻度で交換することで維持できる、管理コストの低いセンサネットワークが実現できる。

本論文は、以下のように構成される。2 章では、関連研究について述べる。3 章では、提案手法における MAC プロトコルとして、RC-MAC の拡張について述べる。4 章では、配送木を構築する経路制御プロトコルについて述べる。5 章では提案手法の消費電力および配送木の評価を行う。6 章で提案手法の実用化にあたっての課題について議論した後、7 章で本論文をまとめる。

## 2. 関連研究

本論文では、管理コスト最小化の観点から、ネットワーク全体の消費電力を低く抑えると同時に、定期的なバッテリー交換が必要な中継ノードの数を最小化するようなデータ配送木を自律的に構築し、維持するようなセンサネットワークの実現を目指している。有力な消費電力の低減手法として、センサネットワークを対象とした MAC 層プロトコルが活発に研究されている [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]。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。S-MAC [1], T-MAC [2], B-MAC [3], X-MAC [4] は、送信ノード主導の MAC プロトコルである。S-MAC [1] と T-MAC [2] は、近傍ノードでグループを形成し、グループごとで送受信タイミングを同期させることで、スリープ時間を確保して省電力化を実現する。しかし、これらの局所的な同期に基づいた MAC プロトコルでは、グループ内の同期だけでなく、グループ間の送受信のためのオーバーヘッドが大きい。B-MAC [3] は非同期の MAC プロトコルであり、同期が不要であるため消費電力を低く抑えられる。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。X-MAC [4] は、B-MAC の長い連続したプリアンブルの代わりに、短い短冊状のプリアンブルを連続的に送信することで、消費電力を B-MAC よりも低減させることができる。しかし、これらの送信ノード主導型 MAC プロトコルでは、プリアンブル送信のための電力が依然として大きく、消費電力の低減には限界がある。

本論文の内容は 2014 年 12 月の第 22 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップにて報告され、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。

より消費電力が低い効率的な MAC プロトコルとして、RI-MAC [5] や RC-MAC [6] 等の受信ノード主導型 MAC プロトコルが提案されている。これらのプロトコルでは、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。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ため、プリアンブルを長時間送信するよりも消費電力を低く抑えられる。受信ノードも受信待受時間を小さく抑えられる。受信ノード主導型として初めて提案された RI-MAC [5] 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 [6] 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いて効率化し、消費電力を低減させる。しかし、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が電力消費に占める割合が大きく、これがボトルネックとなって、実運用にあたって十分な長いノード寿命の実現には至っていない。

これに対して提案手法では、データ配送木の葉ノードで定期的なビーコン送信を省くことで、葉ノードのノード寿命を大幅に改善する。RC-MAC に動作状態を導入し、MAC プロトコルと経路制御を連動させることでこれを実現する。従来の受信ノード主導型 MAC プロトコルでは、MAC プロトコルと経路制御は独立して研究されており、これらを組み合わせることで消費電力を改善する研究はこれまでに見られない。無線センサネットワークの MAC 層プロトコルについては、文献 [7] のサーベイを参考にされたい。

センサノードが環境から電力を得る（充電する）技術も存在し、太陽光パネルだけでなく、人や車、電波等による振動を電力に変えることで、センサノードの長寿命化を実現できる可能性がある [8], [9], [10]。しかし、現時点では、それらの技術によって得られる電力はわずかであり、また、天候等の環境要因に左右されるため、生成される電力に頼ってセンサネットワークを長期的に維持することは困難である。太陽光のみを用いてバッテリーレスなセンサネットワークを構築する試みも現れているが、その通信能力や安定性は限定的であり、用途が大きく限定される [11]。

一方、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 [12]。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 [13]。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。また、本論文で提案する配送木構築手法は、管理コストに着目し、中継ノードの数を最小化することを目的としているが、この最適化指標を用いて配送木を構築する試みは、これまでに見られない。

Gnawali らは、ノードの故障等によるトポロジの変化に柔軟に対応し、パケットループを防ぐ動的な経路制御プロトコル CTP を提案した [14]。この手法は、センサネットワークを対象として、動的なトポロジ変更に対応できる経路制御法を提供する点で貢献がある。しかし、本論文が目指すような管理コストの低減を考慮していないだけでなく、この手法はブロードキャスト可能な MAC プロトコルを想定しており、RC-MAC のような受信ノード主導型の MAC プロトコルを用いる場合には適用が難しい\*1。本論文で目指すような、受信ノード主導の MAC プロトコルを想定した自律的な配送木の構築手法は、これまでに見られない。

### 3. 提案手法：MAC プロトコル

#### 3.1 想定する無線センサネットワーク

本論文では、無線通信機能と何らかのセンサを搭載した多数のセンサノードから構成されるセンサネットワークを想定する。各センサノードは一定時間ごとにセンシングにより生成した値を、ネットワーク内に複数存在するシンクノードのいずれかにマルチホップ通信を用いて転送する。ノードの送信電力は一定であり、シンクノードまで複数の経路でデータを届けられる程度にはセンサが密に配置されていると仮定する。複数のシンクノードが存在してもよく、その場合にも提案手法の動作は何も変わらないが、以後は簡単のため、シンクノードが1つの場合を例に説明を進める。

#### 3.2 提案手法の概要

提案手法は、RC-MAC を拡張し、定期的なデータ集約のみを行う「定常状態」と配送木の構築も行う「配送木構築状態」の2状態を区別することにより、効率的な配送木の構築と消費電力を抑えたデータ集約を兼ね備えた無線センサネットワークを実現する。RC-MAC には、次のような特徴がある。

- (a) 受信ノード主導型 MAC プロトコルであるため、データを受信しない葉ノードにおいては受信動作を省くことが可能であり、さらなる消費電力の削減が見込める。

\*1 RC-MAC の論文 [6] では、ブロードキャストの代わりに近隣の全ノードにユニキャストすることで経路制御プロトコルが動作できると述べられているが、特にセンサ密度が高い場合には明らかに非効率である。

(b) 後述するように、受信ノードによる送信ノードのスケジューリングとビーコン送信タイミングの調整により、フレームが衝突せず、バックオフ時間を省いた効率的なデータ伝送を実現できる。

特に (a) に関して、受信ノード主導型 MAC プロトコルでは、受信処理以外の消費電力を最適化しているがゆえに、受信にかかる定期的なビーコン送信とその後の受信待機が消費電力全体に占める割合が大きくなる。本論文では、この点に着目し、葉ノードにおいて受信のための処理を省くことで大幅な長寿命化を実現し、実運用にあたっての管理コストを低減させる。

このために、各ノードは、効率的に配送木を構築する「配送木構築状態」と、配送木に沿って低い消費電力でデータを集約する「定常状態」の2状態を切り替えて動作する。配送木構築状態では、RC-MAC を拡張してブロードキャスト通信を実現し、4章で述べる経路制御プロトコルを用いて配送木を効率的に構築する。定常状態では、RC-MAC の特徴を生かした消費電力の低い MAC プロトコルを動作させる。特に、配送木の葉ノードではセンシングデータの受信が不要であることを利用して、通常の RC-MAC よりもさらに消費電力を低減させた MAC プロトコルを実現する。

各ノードは、ネットワークの構築時だけでなく、ノード故障等によるトポロジの変化時にも、配送木構築状態になり配送木を再構築する。あるノードがトポロジの変化を検出すると、これを隣接ノードに順に伝えることで、ネットワーク上のすべてのノードが配送木構築状態になり、協調して配送木を再構築したあと、配送木が収束すると定常状態に遷移する。このような動作の中では、ネットワーク上に異なる状態のノードが混在する時間帯があるが、このときにも RC-MAC による効率的な通信が維持されることが肝要である。提案プロトコルでは、いずれの状態でも RC-MAC のデータ通信方式をサポートすることで、状態が異なるノードが混在する場合にも、データ集約の効率が維持されるようなプロトコル設計とした。

### 3.3 RC-MAC

提案 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 RC-MAC の拡張として設計する。本節では、設計の基礎となった RC-MAC の動作を述べる。

RC-MAC [6] では、各ノード  $n_r$  が定期的にビーコンをブロードキャストし、これを受信したノード  $n_s$  が  $n_r$  への送信フレームを持っていれば、 $n_r$  へのフレーム送信を行う。各ノードは定期的にウェイクとスリープを繰り返し、ウェイクしたタイミングでビーコンを送信する。しばらく受信を待ち受け、フレームが受信されなければ、再びスリープする。受信待受時間を削減できるため、送信データ量が少ない場合には大きな消費電力の削減を見込める。また、競

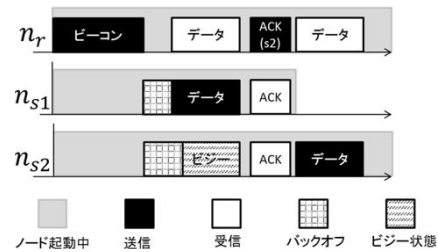


図 1 RC-MAC  
Fig. 1 RC-MAC.

合を受信ノードが中心となって解決するため、隠れ端末問題も効率良く解決できる。

図 1 の例を用いて、動作を説明する。受信ノード  $n_r$  がビーコンを送信すると、すべての送信ノードは、CW (Contention Window) の範囲内でランダムに決めたバックオフ時間だけ待機した後に、データフレームを送信する。 $n_r$  は、データフレームを受信すると、送達確認のために Ack フレームを返す。受信ノードは、送信ノードを学習し記憶しており、Ack フレームを用いて次に送信するノードを指定できる。この場合には、指定されたノードはバックオフ時間の待機なしにフレームを送信できる (図 1 では、Ack フレームに次の送信ノード  $s_2$  を含めることで、すぐに  $s_2$  が送信を開始している)。このため、受信ノードがすべての送信ノードを把握すると、受信ノードはすべての送信ノードを順番に指定することで、バックオフ時間なしに、順番にデータを送信させることができる。このような定常状態では、受信ノードが次に送信するノードを指定することで、送信ノード間で隠れ端末問題が発生しないだけでなく、バックオフ時間を省いた効率的な安定通信が可能になる。

また、近隣のノード間でビーコンの送信タイミングが近い場合には、フレーム間の干渉が発生する可能性がある。これに対して RC-MAC は、近隣とのビーコン送信タイミングを自動的に調整し、互いの送信タイミングが、 $\tau$  以上離れるようにする機能を持つ。ここで  $\tau$  は、1 ビーコンに対して想定される一連の通信時間の最大値であり、管理者が設定する。この機能により、定常状態においては、近隣のフレーム送信が衝突しない安定通信が実現される。

### 3.4 提案 MAC プロトコル

提案 MAC プロトコルを具体的に説明する。提案法は配送木構築状態と定常状態の2状態を持ち、各ノードが状況に応じて状態を切り替えながら動作する。定常状態の動作は、配送木における位置 (中継ノードか葉ノードか) によって少し異なる。下記に、各状態の動作を述べる。

#### 3.4.1 配送木構築状態

ネットワークの起動時やトポロジ変化時に、ノードは配送木構築状態になり、データを効率的に転送する配送木

を構築する。配送木の構築には、隣接ノード間で制御メッセージの交換が必要であり、隣接ノード数が多いセンサネットワークでは、ブロードキャスト通信が必須となる。一方で、RC-MAC に準じた通信を行う定常状態のノードが混在しても、シームレスにデータ通信ができなければならない。

これを実現するために、配送木構築状態では、基本的には RC-MAC と同様に動作するが、スリープすることなくつねに受信待受を行う点が異なる。隣接ノードからの通信がいつでも受信可能になるため、配送木構築状態にある隣接ノードの間では、ブロードキャストフレームの送受信が可能になる。ブロードキャストは、4章で述べる経路制御プロトコルにより、一定時間ごとに制御メッセージを送信するために利用される。制御メッセージの送信タイミングは規定しないが、定常的な通信との衝突を防ぐために、RC-MAC のビーコン送信タイミングに準ずることが望ましい。ビーコンが制御メッセージを含んでもよい。

また、配送木構築状態になると、ビーコン、送信データフレーム、および Ack フレームにフラグを立て、これらを受信したノードは、配送木構築状態でなければ配送木構築状態に遷移する。これにより、あるノードが配送木構築状態になれば、ネットワーク内の全ノードが連鎖的に配送木構築状態になり、協調して配送木を構築する。ノードが配送木構築状態になって一定時間が経過すると、定常状態に遷移する。ノードが配送木構築状態にある期間の長さとして、配送木の収束にかかる時間と比較して十分に長い値をあらかじめ設定しておく。この期間が多少長くなったとしても、ネットワークの運用期間と比較すると十分に短いので、安定したネットワークでは消費電力への影響はわずかである。

### 3.4.2 定常状態

定常状態は、配送木の葉ノードであるか、中継ノードであるかによって、少し動作が異なる。

**中継ノード**：中継ノードである場合は、RC-MAC と同じ動作をする。配送木が確定しており、RC-MAC が配送木に依存した通信パターンを学習するため、干渉のない安定したデータ通信が行われる。トポロジの変化を検出すると、配送木構築状態に遷移する。具体的には、(1) 親ノードに一定時間データフレームを送信できない、(2) 子ノードから一定時間データフレームが届かない、(3) 親ノードからフラグが立った Ack フレームを受信する、(4) 子ノードからフラグが立ったデータフレームを受信する、(5) 親ノードから通知される（シンクノードからの）距離が変化する、のいずれかの条件により、配送木構築状態に遷移する。

**葉ノード**：葉ノードである場合は、中継ノードとは異なりデータフレームの受信を行わないため、その処理を省くことで、さらなる省電力化を行う。中継ノードとの相違は、定期的に送信するビーコンを止めることである。これによ

り、ビーコンの送信後にしばらく受信待受をすることもなくなり、省電力化の効果は大きい。中継ノードと同様に、(1), (3), (5) のいずれかの条件を検知すると、配送木構築状態に遷移する。

## 4. 提案手法：経路制御プロトコル

### 4.1 概要

配送木の構築は、配送木構築状態において実行される。この間に、各ノードは定期的にブロードキャストメッセージを送信することで隣接ノードと必要な情報を交換し、自律分散的に配送木を構築する。配送木が構築されると定常状態に遷移するが、その後でも、ノードの故障等によりトポロジが変化すると、3.4.2 項で説明したように、提案手法ではネットワーク上のすべてのノードが配送木構築状態になり、改めて適切な配送木が構築される。

配送木の構築にあたっては、バッテリー交換にかかる管理コストの最小化を目指す。ある配送木が構築されたとき、葉ノードはデータの受信が不要であるため、受信ノード主導型の MAC プロトコルを用いると 10 年以上の寿命を確保できうるのに対して、中継ノードは長くても 1~2 年程度の寿命であることを想定する。このため、中継ノードは定期的なバッテリーの交換が必要であり、その分の管理コストがかかる。本論文では、中継ノードの数を少なくするような配送木の構築プロトコルを設計することで、バッテリー交換に要する管理コストを低減させる。

### 4.2 シンクノードまでの距離の把握

本論文で提案する配送木構築プロトコルでは、まず、すべてのノードが、シンクノードまでの距離（ホップ数）を把握する。このために、定期的にブロードキャストする制御メッセージに、自分からシンクノードまでの距離を含める。この情報を隣接ノードと繰り返し交換することにより、すべてのノードが、シンクノードまでの正しい距離を把握する。

初期状態では、シンクノードだけが、距離を 0 として持っている。シンクノードまでの距離を把握するために、各ノードは一定時間ごとに制御メッセージを送信する。制御メッセージには、そのノード  $n_s$  が把握している、 $n_s$  のシンクまでの距離  $dist(n_s)$  が格納される。そのうえで、制御メッセージを受信したノード  $n_r$  は以下のように動作する。受信したメッセージに格納されている距離  $dist(n_s)$  と自分が保持する距離  $dist(n_r)$  を比較する。 $dist(n_r)$  がまだ設定されていないか、 $dist(n_s) + 1 < dist(n_r)$  であれば、 $dist(n_r) = dist(n_s) + 1$  とする。そうでなければ、何もしない。すべてのノードがこの手順を繰り返すことにより、最終的には、すべてのノードが自分の正しい距離を把握できる。

図 2 は、定期的に送信される制御メッセージにより、各

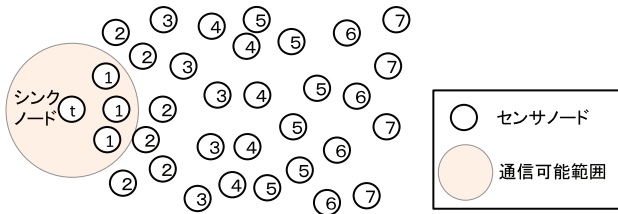


図 2 シンクノードからの距離の把握

Fig. 2 Computing distance from sink node.

ノードがシンクノードからの距離を把握する様子である。シンクノードが送信する制御メッセージを受信したノードは距離を 1 とし、距離が 1 であるノードの制御メッセージを受信したノードは距離を 2 とする。同様の処理により、一定時間が経過すると、全ノードがシンクノードからの距離を把握する。なお、ノードが故障する等の理由で距離が変わる場合がある。これに対して提案手法では、先述のとおり、次ホップ（つまり親ノード）が到達不能になるか、その距離が変われば、配送木構築状態に遷移して配送木を再構築する。これにより、つねに正しい距離を維持できる。

### 4.3 次ホップの決定

各ノードにおいて次ホップを決定することで、配送木が構築される。本論文では、ネットワークの管理コストを低減させるために、中継ノード数が少ない配送木を構築する。これは、通信を一部のノードに集中させることで実現できる。そこで提案手法では、各ノードが、次ホップの候補の中で、配送木における子孫の数が最も大きいノードを次ホップとして選ぶ。各ノードがセンシングにより生成するデータ量が等しいと仮定すると、子孫数は、そのノードが中継しなければならぬデータ量を表すため、子孫数が大きいノードを次ホップに選ぶことで、通信を一部のノードに集中させることになる。具体的には、各ノードが自分の子孫数を把握するために、配送木構築状態において定期的に送信する制御メッセージに、自分の（その時点で把握している）子孫数と次ホップを含める。各ノードは、自分を次ホップに選んでいるノード、つまり子ノードをすべて把握でき、したがって自分の子孫数の合計を把握できる。制御メッセージは定期的に送信されるため、十分な時間が経過すると各ノードの子孫数等の情報が行き渡り、配送木は収束する。次ホップの候補を、シンクノードまでの距離が自分より 1 だけ小さいノードの集合とすると、配送経路長がシンクノードまでの距離と等しい配送木が効率的に構築できそうである。しかし提案手法では、中継ノード数をさらに減少させるために、自分と同じ距離のノードも候補に加える。そのアイデアを図 3 に示す。図 3 は配送木の一部を示しており、ノードに付与されている数字はシンクまでの距離を表す。また、矢印は各ノードの次ホップを表す。ノード A, B, および D が次ホップを決めるとき、候

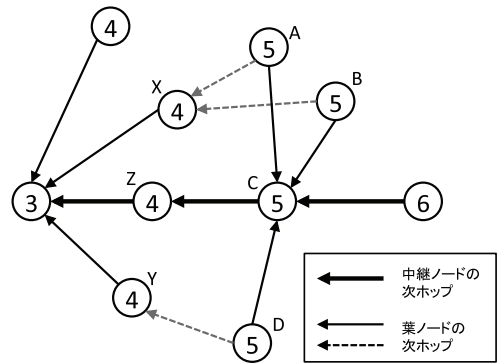


図 3 次ホップ選択のアイデア

Fig. 3 The idea to select next hops.

補を距離が自分より 1 だけ小さいノードに限定すると、(Z は A, B, D と隣接しないため) A, B, D はそれぞれ距離 4 のノードの中で X, X, Y を次ホップに選ぶ（この状況を点線矢印で示す）。つまり、X と Y は中継ノードとなり、中継ノードが増加する。一方、同じ距離のノードも候補とすると、A, B, D は C を次ホップとすることで、距離 4 の中継ノードは Z のみとなり（これを実線矢印で示す）、中継ノード数を抑えられる。

しかし、同じ距離のノードを次ホップとして選ぶことで、経路がループする恐れがあり、これを避ける必要がある。提案手法では、葉ノードのみが同じ距離のノードを次ホップに選べるように制限することで、この問題を防ぐ。具体的には、各ノードは、隣接ノードから制御メッセージを受信するたびに、次の手順で次ホップを決定する。

- (a) 制御メッセージを受信したとき、自分が他のノードの次ホップとして選ばれていれば、距離が 1 小さいノードの中で子孫数が最大のノードを次ホップに選ぶ。
- (b) 自分がどのノードからも次ホップに選ばれていなければ、同じ距離のノードも候補に加えて、子孫数が最大のノードを次ホップに選ぶ。

自分が次ホップに選ばれていない場合に限り同じ距離のノードを次ホップに選ぶため、ループは生じない。自分が次ホップに選ばれているがまだ制御メッセージにより知らされていない、という場合がありうるが、ビーコンが制御メッセージを兼ねる場合には、パケット送信の直前にビーコンにより必要な情報が伝達されるため、パケットがループすることはない。

### 4.4 配送木の収束保証

提案手法において、配送木は振動することなく有限時間で収束することを示す。各ノードのセンシング間隔を  $r$ 、制御メッセージ送信間隔を  $p$ 、シンクノードから最も距離が大きいノードのホップ数を  $H$  とおく。配送木の構築は、(i) 全ノードの配送木構築状態への遷移、(ii) シンクノードからの距離の把握、(iii) 次ホップの決定、の 3 つのステップから構成される。初期状態から配送木を構築する場合に

は (ii) と (iii) のみからなり，トポロジ変化による配送木の再構築は (i)～(iii) のすべてからなる。

(i) 配送木構築状態への移行は，先述のとおり，トポロジ変化の検出により始まる．あるノードでトポロジ変化が検出されると，配送木の幹である中継ノードを通じてネットワーク全体に伝達される．トポロジ変化を検出したノードが葉ノードであれば，その親である中継ノードにまず伝達される．伝達される距離は最長で  $2H$  ホップであり，したがって最長  $2pH$  の時間で実行される．葉ノードは，センシング間隔  $r$  でデータを中継データに送信し，このときにトポロジの変化が伝達される．上記より，制御メッセージが損失しないと仮定すると，時間  $2pH+r$  以内に全ノードが配送木構築状態になる．制御メッセージが損失しても，先述のようにトポロジ変化が検出され，メッセージが損失したリンクの両端ノードからネットワーク全体に伝達される．したがって，多少の時間の損失はあるものの，最終的には必ずすべてのノードが配送木構築状態に遷移する。

(ii) シンクノードからの距離は，シンクノードに近いノードから順番に，正しい距離が把握される．したがって，(i) の完了後，時間  $pH$  以内に全ノードが正しい距離を把握する。

(iii) 次ホップは子孫数に依存して決定されるため，配送木の葉に近いノードから確定していく．つまり，シンクノードからの距離が  $k+1$  以上であるノードの次ホップが決まっていれば，距離が  $k$  であるノードは，次ホップ候補の中で最も子孫数が多いノードを選択することで，次ホップが収束し，確定する．この処理が，シンクノードからの距離が大きいノードから順番に繰り返されることで，最終的には配送木全体が収束する．なお，次ホップの選択が永遠に振動するようなことはなく，収束が保証される．これは，距離が  $k$  であるノード群が次ホップを決めるときに，他のノードの次ホップの変更が原因で自分の次ホップを変更することはあるが，各ノードは子孫数がより多いノードにしか次ホップを変更しないため，いずれ子孫数がそれ以上大きくなならないノードを次ホップに選ぶからである。

## 5. 評価

### 5.1 消費電力の評価

#### 5.1.1 評価方法

提案手法と既存手法の消費電力を見積もり，ネットワークの寿命を比較する．本比較では，各ノードの動作から定常状態における消費電力をモデル化し，モデルに基づいて解析的に消費電力を見積もる．なお，センシングの時間間隔が十分に長いセンサネットワークにおいては，RC-MAC ではフレームの送信スケジュールが安定し，フレームが衝突する可能性は非常に低い．このことから，提案手法の定常状態でも，フレームが衝突しないものと仮定する。

既存手法としては，低消費電力で動作する MAC プロト

コルである RC-MAC [6] を用いる．RC-MAC は配送木の構築機能を持たないが，評価にあたっては，提案手法の配送木を用いることを仮定する。

#### 5.1.2 フレームサイズ

提案手法では MAC フレームの構造や各フィールドのサイズを規定することはないが，評価のために用いるフレームサイズの想定について述べておく。

各ノードは， $r$  [秒] ごとにセンシングを行い，得られた値は 2 [Bytes] の値とする．各ノードは 4 [Bytes] で表現されるノード ID を持つ．各ノードが  $r$  [秒] ごとに送信するデータフレームは，ヘッダに送信元ノード ID，次ホップノード ID，シーケンス番号 (2 [Bytes]) に加えて，プロトコルバージョンやチェックサム等の制御用フィールドを加えて 24 [Bytes] とする。

ビーコンフレームは，定常状態では，送信元ノード ID に少しの制御用フィールドを含み，6 [Bytes] とする。

配送木構築状態では，ビーコンと同じ頻度で制御メッセージを送信することにする．制御メッセージに含まれるのは，送信元ノードの ID (4 [Bytes])，子孫の数 (4 [Bytes])，次ホップノードの ID (4 [Bytes])，となり，その結果，フレームサイズは，14 [Bytes] となる．本評価においては，ビーコンと制御メッセージは同じフレームで送信されることを仮定する。

なお，本評価ではノード数として最大 1,000 ノード程度を想定するが，センシング間隔を 300 [秒] とし，MICA2 [19] を想定して通信速度を 250 [Kbps] とすると，最も高負荷なシンクノード付近でも，データおよび Ack フレームで 100 [Bytes/sec] 程度の通信量となる．これは，通信速度の 0.3% 未満の通信量であり，ビーコン等の MAC プロトコルのオーバーヘッドを考慮しても，提案手法で十分にリアルタイム処理できる規模である。

#### 5.1.3 電力モデル

消費電力は，無線センサとして頻繁に利用される MICA2 [19] の消費電力をモデル化し，これを基に計算する．MICA2 の種々の動作に対する消費電力は，文献 [3], [15], [16] に掲載されている値を用いた (表 2)．MICA2 は単三電池 2 本で動作し，その容量を  $C_{batt} = 2,500$  [mAh] とする．また，動作電圧は  $V = 3$  [V] である．なお，バッテリーは年単位の利用では多少の経年劣化が見られると考えられるが，その程度や特性は電池の種類等により異なるため，本モデルでは考慮しない。

消費電力モデルは，文献 [3] に用いられているものを用いた．すなわち，1 秒あたりの消費電力を  $E$  とおくと， $E$  は次式で表される．

$$E = E_d + E_{tx} + E_{rx} + E_{listen} + E_{sleep} \quad (1)$$

ここで， $E_{rx}$  は受信電力， $E_{tx}$  は送信電力， $E_{listen}$  は受信待受電力， $E_d$  はセンサからデータを取得する電力， $E_{sleep}$

表 1 設定パラメータ  
Table 1 Parameters.

変数	意味	値
$C_{batt}$	バッテリー容量	2,500 [mAh]
$V$	動作電力	3 [V]
$b$	ビーコン送信間隔 (秒)	20 [秒]
$p$	制御メッセージ送信間隔 (秒)	20 [秒]
$r$	センシング間隔 (秒)	300 [秒]
$l_{data}$	データフレームサイズ	24 [Bytes]
$l_{ack}$	Ack フレームサイズ	6 [Bytes]
$l_{beacon}$	ビーコンサイズ	6 [Bytes]
$l_{control}$	制御メッセージサイズ	14 [Bytes]
$t_{lifetime}$	ノードの寿命 (秒)	-
$t_{converge}$	経路収束までの時間 (秒)	500 [秒]
$t_{xwait}$	送信時のビーコン待受時間 (秒)	1 [秒]
$t_{CW}$	ビーコン送信後の受信待ち時間 (秒)	0.3 [秒]

表 2 消費電力諸元  
Table 2 Energy consumption.

操作	時間 (秒)	電流 (mA)
センサからのデータ取得	$t_{data}$ 1.1	$C_{data}$ 20
データ送信 (1 バイト)	$t_{txb}$ $416 \times 10^{-6}$	$C_{txb}$ 20
データ受信 (1 バイト)	$t_{rxb}$ $416 \times 10^{-6}$	$C_{rxb}$ 15
受信待受	-	$C_{listen}$ 7
スリープ	-	$C_{sleep}$ 0.030

はスリープに必要となる電力である。個々の値は、用いる MAC プロトコルやノードにより異なる。以下では、ビーコン送信間隔を  $b$  (秒)、センサからのデータ取得間隔を  $r$  (秒)、送信するデータフレームのサイズを  $l_{data}$  とする。これらを含めて、設定パラメータ、および消費電力諸元を、それぞれ表 1 と 2 に示す。

### 定常状態の消費電力

#### (a) 提案手法の葉ノード

$E_d$ : センシング 1 回あたりの消費電力は  $t_{data}C_{data}V$  であり、これが  $r$  秒に 1 度必要であるから、1 秒あたりの消費電力は、 $E_d = \frac{t_{data}C_{data}V}{r}$  である。センシングにかかる消費電力は、すべてのノード、すべての動作モードに共通である。

$E_{tx}$ : データの送信も  $r$  秒に 1 度であり、1 フレームの送信に必要な電力は  $l_{data}t_{txb}C_{txb}V$  であるから、1 秒あたりの消費電力は、 $E_{tx} = \frac{l_{data}t_{txb}C_{txb}V}{r}$  である。

$E_{rx}$ : 葉ノードは、データフレームの送信時に親ノードからビーコンと Ack フレームを受信する。よって、 $E_{rx} = \frac{(l_{beacon} + l_{ack})t_{rxb}C_{rxb}V}{b}$  である。

$E_{listen}$ : 受信待受は、提案手法では、データ送信のたびに発生する。送信データの発生タイミングが親ノードのビーコンと無相関であれば、1 回あたりの待受時間の平均が  $\frac{b}{2}$  であるが、ビーコンの送信は一定時間ごとであるため、送信ノードは、送信のためにウェイクするタイミングを学習できる。ここでは、学習の結果、送信のためのビー

コン受信待受は、 $t_{xwait} = 1$  [秒] に短縮されたと仮定する。よって、1 秒あたりの消費電力は、 $E_{listen} = \frac{t_{xwait}C_{listen}V}{r}$  である。

$E_{sleep}$ : スリープの時間は、上記いずれにも含まれない時間すべてであるから、 $t_{sleep} = 1 - \frac{t_{data}}{r} - \frac{l_{data}t_{txb}}{r} - \frac{l_{ack}t_{rxb}}{r} - \frac{t_{xwait}}{r}$  であり、その消費電力は、 $E_{sleep} = t_{sleep}C_{sleep}V$  である。

#### (b) 提案手法の中継ノード

中継ノードでは、葉ノードの処理に、データフレームを送受信する処理が加わる。また、送受信すべきデータの量は、そのノードの子孫の数に比例し、この分の電力が必要になる。このため、送信電力、受信電力、待受電力が葉ノードとは異なる。

$E_{tx}$ : 送信するデータ量は配送木における子孫の数に比例し、その分の送信電力が必要になる。これと同数のデータフレームを受信するが、この際に Ack フレームを送信する。また、データを受信するために、定期的にビーコンを送信する必要がある。配送木における子孫の数を  $n_{descendant}$  とすると、必要な送信電力は、 $E_{tx} = \frac{n_{descendant}(l_{data} + l_{ack})t_{txb}C_{txb}V}{r} + \frac{l_{beacon}t_{txb}C_{txb}V}{b}$  である。

$E_{rx}$ : 受信電力は、親ノードからのビーコンの受信と、子ノードからのデータの受信、および、親ノードへデータを送信した際の Ack フレームの受信にかかる電力の和である。よって、 $E_{rx} = \frac{l_{beacon}t_{rxb}C_{rxb}V}{b} + \frac{n_{descendant}(l_{ack} + l_{data})t_{rxb}C_{rxb}V}{r}$  である。

$E_{listen}$ : 待受電力は、データ送信待ちにかかる電力と、ビーコンを送信した後の受信待ちにかかる電力の和である。後者にかかる時間  $t_{CW}$  は Contention Window (CW) の大きさに依存するが、通信速度から適切な値として 300 [ms] を設定する。待受電力は、 $E_{listen} = \frac{t_{xwait}C_{listen}V}{r} + \frac{t_{CW}C_{listen}V}{b}$  である。

#### (c) 比較手法 RC-MAC

RC-MAC の消費電力は、中継ノードにおいては提案手法と同じである。葉ノードにおいては、フレーム受信のためにビーコンを送信し、 $t_{CW}$  の間だけ受信待受をする電力が追加される。これにより、送信電力と待受電力が提案手法とは異なる。

$E_{tx}$ : 送信電力は、ビーコンの送信電力を提案手法の葉ノードに追加して、 $E_{tx} = \frac{l_{data}t_{txb}C_{txb}V}{r} + \frac{l_{beacon}t_{txb}C_{txb}V}{b}$  である。

$E_{listen}$ : 待受電力は、提案手法の中継ノードと同じであり、 $E_{listen} = \frac{t_{xwait}C_{listen}V}{r} + \frac{t_{CW}C_{listen}V}{b}$  である。

### 配送木構築状態の消費電力

#### (a) 提案手法の葉ノード

配送木構築状態では、提案手法は、送受信以外のすべての時間で受信待受を行うため、受信待受時間が大幅に増大する。また、このため、周囲のノードのビーコンと制御メッ



セージをすべて受信することになり、受信電力も増大する。さらに、葉ノードも配送木構築状態ではビーコンと制御メッセージを送信するため、送信電力も増大する。

$E_{rx}$ : 隣接ノードからのビーコンと制御メッセージをすべて受信するため、その分の受信電力が提案手法の葉ノードに追加される。そのノードの隣接ノード数を  $n_{neigh}$  とすると、受信時間は、 $t_{rx} = \frac{l_{ack}t_{rxb}}{r} + \frac{n_{neigh}l_{beacon}t_{rxb}}{b} + \frac{n_{neigh}l_{control}t_{rxb}}{p}$  であり、受信電力は  $E_{rx} = t_{rx}c_{rxb}V$  である。

$E_{tx}$ : 定期的なビーコン送信と制御メッセージ、およびデータの送信が必要になる。したがって、送信時間は  $t_{tx} = \frac{l_{data}t_{txb}}{r} + \frac{l_{beacon}t_{txb}}{b} + \frac{l_{control}t_{txb}}{p}$  であり、送信電力は  $E_{tx} = t_{tx}c_{txb}V$  となる。

$E_{listen}$ : 送受信していない時間はすべて受信待受時間である。よって、1秒あたりの受信待受時間は、 $t_{listen} = 1 - t_{tx} - t_{rx}$  であり、受信待受電力は、 $E_{listen} = t_{listen}c_{listen}V$  となる。

$E_{sleep}$ : スリープしないため、電力は  $E_{sleep} = 0$  である。

(b) 提案手法の中継ノード

中継ノードでは、葉ノードの電力に加えて、データの送受信の電力が追加される。

$E_{rx}$ : 葉ノードの受信電力に、子孫数のデータと Ack の受信が加わる。そのノードの子孫数を  $n_{descendant}$ 、隣接ノード数を  $n_{neigh}$  とすると、受信時間は、 $t_{rx} = \frac{l_{ack}t_{rxb}}{r} + \frac{n_{neigh}l_{beacon}t_{rxb}}{b} + \frac{n_{neigh}l_{control}t_{rxb}}{p} + \frac{n_{descendant}(l_{data}+l_{ack})t_{rxb}}{r}$  であり、受信電力は  $E_{rx} = t_{rx}c_{rxb}V$  である。

$E_{tx}$ : 葉ノードの送信電力に、子孫数のデータと Ack の送信が加わる。送信時間は、 $t_{tx} = \frac{l_{data}t_{txb}}{r} + \frac{l_{beacon}t_{txb}}{b} + \frac{l_{control}t_{txb}}{p} + \frac{n_{descendant}(l_{data}+l_{ack})t_{txb}}{r}$  であり、送信電力は  $E_{tx} = t_{tx}c_{txb}V$  となる。

ノードの寿命

提案手法の消費電力は、先述の、1秒間あたりの消費電力を用いて、次式によりノードの寿命を求める。ここで、 $E^s$  は定常状態の電力を表し、 $E^c$  は配送木構築状態の電力を表す。 $t_{converge}$  は、配送木が収束するまでの時間を示す。

$$t_{lifetime} = \frac{(C_{batt} - \frac{E^c}{t_{converge}}) \times V}{E^s} \times 60 \times 60 \quad (2)$$

5.1.4 評価結果

提案手法と RC-MAC の葉ノードのノード寿命をそれぞれ図 4 と図 5 に示す。RC-MAC の場合には、ノードの寿命はおおむね 2 年程度であるのに対して、提案手法はおおむね 5 年以上の長寿命を実現できている。これは、葉ノードにおいては 20 秒に 1 回のビーコンの送信とこれにともなう受信待受の消費電力が支配的であり、これらの処理を省くことによって、大幅な消費電力の低減が可能であることを示している。また、これらの図には、提案手法において電力消費割合が大きかったスリープ電力を、MICA2 の既定値である 0.03mA から変更した値も示した。その結

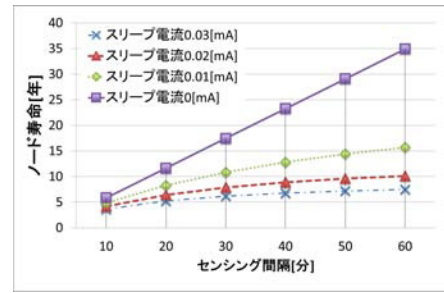


図 4 提案手法：葉ノードの寿命

Fig. 4 Proposed: Lifetime of leaf nodes.

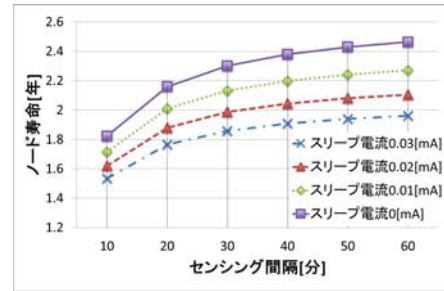


図 5 RC-MAC：葉ノードの寿命

Fig. 5 RC-MAC: Lifetime of leaf nodes.

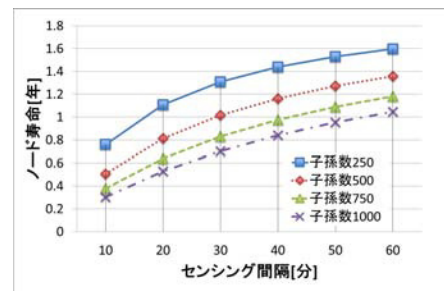


図 6 提案手法：中継ノードの寿命

Fig. 6 Proposed: Lifetime of relay nodes.

果、スリープ電流を低減させることで、葉ノードは 10 年以上の長寿命化を実現できることが分かった。なお、MICA2 は少し古い製品であるが、より新しいセンサノード端末の 1 つである MICAz ではスリープ電流は  $9\mu A$  [17], TelosB では  $6.1\mu A$  [18] にまで低減している。

図 6 は、提案手法における、中継ノードの寿命を表している。提案手法の中継ノード（定常中継ノード状態）は RC-MAC と同じ動作をするため、RC-MAC とは比較していない。中継ノードでは、センシング間隔と配送木における子孫数が支配的であり、図 6 から、そのことが見てとれる。図 5 との差分は、子孫ノードからのデータの送信であり、データ送信量によるノード寿命への影響の大きさが分かる。

中継ノードはバッテリー交換が必要になることから、管理コストを低減させるためには、一定以上の寿命があることが望ましい。しかし、ハードウェアが進歩しても、送受信にかかる電力は、送受信の電波強度が変わらない限り、大

きくは変わらない。本評価では、送信電力は 10 [dbm] を想定しているが、送信電力を低くすることで、バッテリーを交換するノードの数が増えるものの、ノードの寿命を延ばせると考えられる。また、今回は通信速度に合わせるために Contention Window (CW) を 0.3 [ms] としたが、通信速度が速くなれば、受信待受時間を低減させることができ、ノードの寿命を延ばせる可能性がある。

## 5.2 配送木の評価

### 5.2.1 評価方法

本論文では、バッテリー交換にかかる管理コストを低減させるような配送木を構築する。配送木の評価として、配送木の収束時間と、構築された配送木における中継ノードの数を評価した。

評価には C++言語で開発した自作のシミュレータを用いた。本シミュレータでは、各ノードが一定時間ごとに制御メッセージを送信し、配送木が収束するまでを模倣した。データフレームの配送や MAC プロトコル等は扱わず、したがって、制御メッセージの損失がないことを仮定した。1,000×1,000 [m] の正方形領域にノードをランダムに配置し、左辺中央にシンクノードを 1 つ設置した。各ノードの送信電力は 10 [dbm] を想定し、通信可能範囲を半径 100 [m] の円とした。送信電力 10 [dbm] のときの通信可能距離は、文献 [11] で用いられている値と同じである。

配送木の収束時間の評価では、提案手法において、ランダムシード値を変えて、各ノード数に対して 50 回の実験を行い、配送木の収束時間を測定した。配送木の収束時間は、十分に長い時間シミュレーションを実施したうえで、最後にいずれかのノードで次ホップが変更された時間とした。ランダムシードを変更することにより、一定時間間隔で送信されるビーコンの送信タイミングが変わり、ビーコンの送信順序が変わることにより、収束時間が変化する。

配送木の中継ノード数の評価では、提案手法を含めた 3 手法を比較した。比較手法としては、各ノードが自分よりもシンクまでの距離が 1 だけ小さいノードの中からランダムに次ホップを選ぶランダム法と、各ノードが自分よりもシンクまでの距離が 1 だけ小さいノードの中から子孫数が最大であるノードを選ぶ単純選択法を実装し、提案手法と比較した。

### 5.2.2 結果と考察

まず、収束時間の評価結果を図 7 に示す。この箱髭図では、各ノード数に対する収束時間の最小値、第 1 四分位点、中央値、第 3 四分位点、最大値が示されている。収束時間は、各ノードのビーコンタイミングにより変化するが、ノード数によらず、200~500 秒の間に収まるのが分かる。いずれのノード配置においても、シンクからの距離の最大値は 13 であった。よって、4.4 節のステップ (ii), (iii) の議論により、シンクノードからの距離の把握は最大

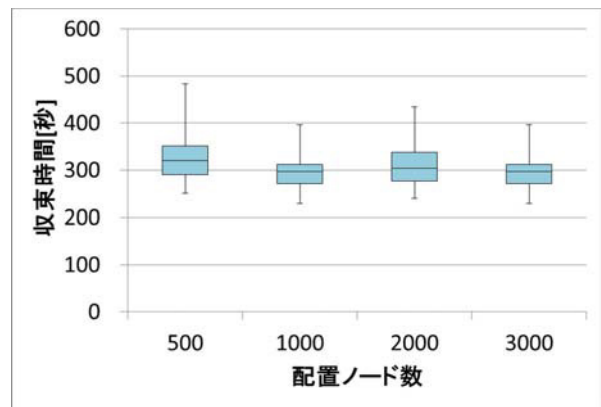


図 7 配送木の収束時間

Fig. 7 Convergence time of delivery tree.

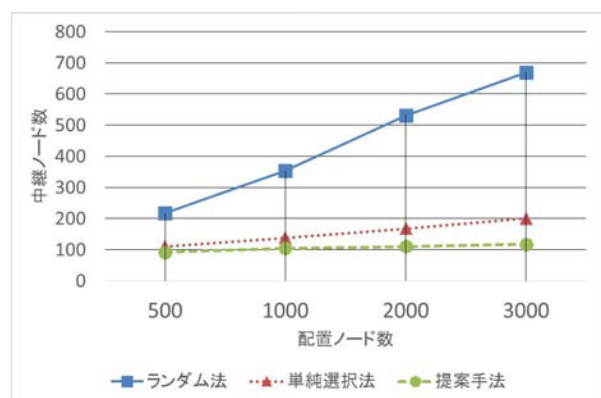


図 8 中継ノード数の変化

Fig. 8 Number of relay nodes.

$pH = 20 \times 13 = 260$  [秒] で完了し、次ホップノードの選択は、各距離の次ホップが制御メッセージ 1 回で収束したとすると、260 [秒] 以内で完了する。観測された値はどれも、上記の合計 520 [秒] よりも小さく、(iii) の収束時間は問題にならない程度に小さいことが分かる。結論として、提案手法では、配送木構築状態に遷移してから一定時間で定常状態に戻るが、配送木構築状態の間に配送木が収束するような現実的な時間を設定できることが示された。

次に中継ノード数を評価する。領域内にランダム配置するノード数を変化させた場合の 3 手法の中継ノード数を図 8 に示す。配置するノード数によらず、提案手法の中継ノード数が最も少なく、優れている。また、ノード数、つまりノード密度を増大させると、ランダム法や単純選択法では中継ノード数が相応に増加するのに対して、提案手法では増加はわずかであることが分かる。つまり、提案手法では、中継ノード数はノード数や密度には依存せず、フィールドの大きさと通信可能距離に依存している。したがって、提案手法では、フィールドの大きさと通信可能距離が決まれば、バッテリー交換が必要な中継ノード数が見積もれるという利点がある。具体的には、10 [dbm] の送信電力で 100 [m] の通信が可能だとすれば、1,000×1,000 [m] の

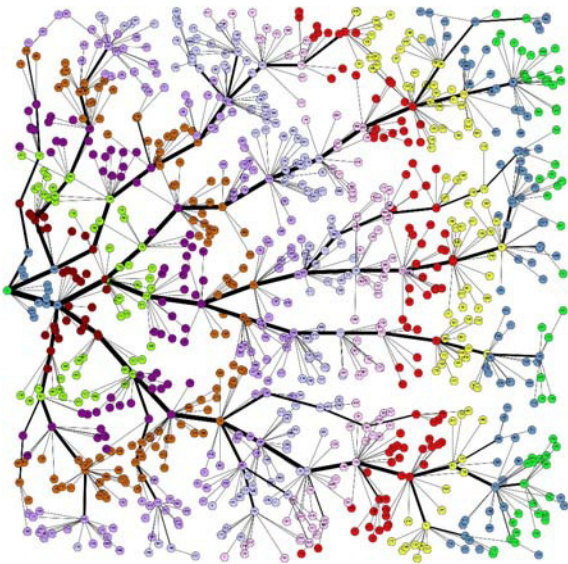


図 9 提案手法による配送木  
Fig. 9 Delivery tree in proposed method.

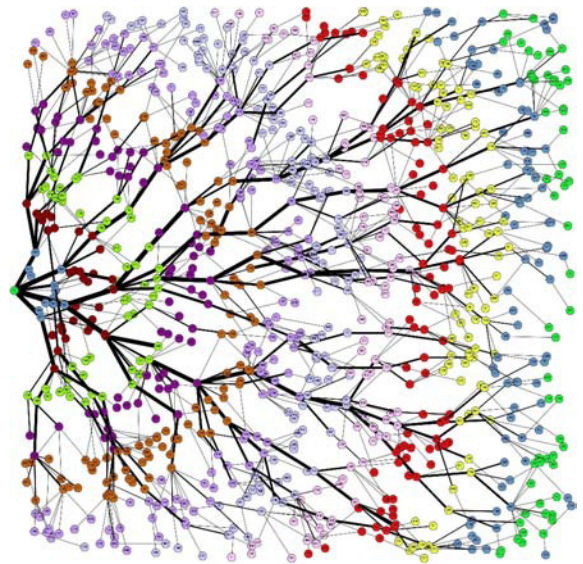


図 11 ランダム法による配送木  
Fig. 11 Delivery tree in random method.

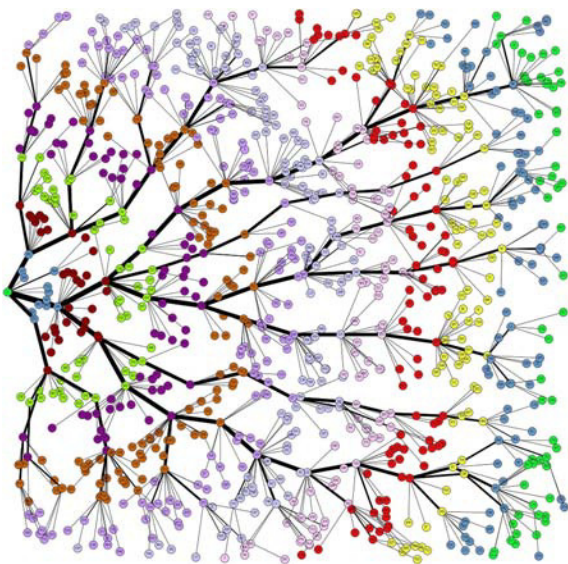


図 10 単純選択法による配送木  
Fig. 10 Delivery tree in simple selection method.

フィールドでは 100 個程度のノードのバッテリー交換が必要となる。

次に、比較した 3 手法で得られた配送木の例を図 9 と図 10, 図 11 に示す。配送木のノードは、シンクノードまでの距離によって色分けされており、子孫数が多いほどリンクを太く表示している。ランダム法では数多くの枝が交差しているのに対し、単純選択法では幹の間の距離が離れた効率的な配送木を構築できている。提案手法では、単純選択法に比べてさらに幹の間の距離が離れ、より最適性の高い配送木が構築された、つまり、中継ノード数がより少ない配送木が構築されたことが見てとれる。

## 6. 実用に関する議論

提案するセンサネットワークの実用化にあたっての議論を行う。まず、バッテリーの交換コストは、交換ノード数が多数になるほど大きくなり、その削減効果も大きくなることを指摘しておく。たとえば、農場等の広大な土地に土中温度や湿度を計測するセンサを設置する場合には比較的密な配置を必要とするため、センサ数も膨大になり、これを少数に抑えることは管理コストを大幅に削減する。本実験の結果からは、 $1,000 \times 1,000$  [m] の領域においては交換ノード数を 100 個程度に抑えられることが示されており、定期的に全ノードの交換をすることと比較すると、大きな管理コストの削減になる。

また、市街地等においては、バッテリーを交換しにくい位置にセンサを配置する場合があります。提案手法はこのような場合にも便利である。交換しにくい位置のセンサを葉ノードにしてバッテリー交換を不要にすれば、管理コストの低減につながるからである。このためには、中継ノードになる優先度を設定しておき、できるだけ優先度の高いノードが中継ノードに選ばれるような仕組みを実装するという対策が考えられる。そのような仕組みの実装は容易である。

次に、パケット損失の影響について議論する。提案手法は、農場や市街地を含めて、一定の領域に対して定期的な測定を行いたい場面を想定する。各ノードでは周期的にセンサの測定値が発生するが、通信量がシンクノード付近であっても大きくなりすぎない程度に測定周期が長く設定され、各周期の通信パターンが安定することを仮定する。また、ノードが頻繁に追加や削除されないため、トポロジの変化が頻繁には発生せず、安定することも仮定する。このような状況では、配送木構築状態の間に、RC-MAC の機能

により、通信が干渉しないビーコンタイミングを各ノードが学習すると、以後はパケットの損失が少ない安定した通信が可能になる。ただし、外的要因により多少のパケット損失が発生することも考慮が必要である。提案手法では、トポロジ変更時に全ノードが配送木構築状態に遷移するため、パケット損失のたびにトポロジ変更と見なしては、消費電力が極度に大きくなり、ネットワークの寿命が短くなる恐れがある。この問題に対しては、MANETのルーティングプロトコルと同様に、複数回の連続した損失により初めてトポロジ変更を検出することで対応できる。つまり、 $k$ 回未満の連続したパケット損失に対しては、配送木構築状態に遷移せず、損失したパケットが次の送信機会に再送されることを期待する。 $k$ はネットワークの電波状況に応じて適切に設定する。上記の方法により、1度構築した配送木を長期間にわたり安定利用することが可能になり、頻繁に配送木構築状態になり電力を浪費することなく、安定した運用が可能になる。

ところで、提案手法は通信を特定ノードに集中させることで管理コストを低減させることを狙いとすが、この戦略は、ネットワークの長寿命化にも寄与する可能性があることを述べておく。一般的には、ネットワークの長寿命化のためには、すべてのノードの電力を均等に使用する戦略が用いられることが多い。しかし、受信ノード主導型MACプロトコルにおいてこの戦略を用いると、すべてのノードが受信のための処理（ビーコン送信等）を実行することになり、電力効率が悪い。これに対して提案手法では、中継ノードのみが受信のための処理を実行することで、大きな割合を占める葉ノードの消費電力を大幅に削減し、ネットワーク全体の消費電力も大きく低減させている。したがって、もし、中継ノードの消費電力が一定以下になったときに配送木を再構築し、中継ノードを適応的に変更する仕組みを導入すれば、従来法と比較してネットワークの寿命を大幅に延長できる可能性がある。ただし、このような長寿命化のための具体的な配送木の再構築プロトコルの設計については今後の課題である。

ノード間の同期制御の影響についても議論しておく。センサノードは、定常状態ではウェイクとスリープを繰り返すが、データ送信時には送信ノードと受信ノードが同時にウェイクしている必要があるため、ノード間でタイミング同期が必要である。センサノードには安価なハードウェアが用いられるため、ノード間のタイミング同期の誤差が比較的大きくなる傾向がある。提案手法では、配送木の親子間で定期的に通信が発生するため、このときに同期誤差を補正することが可能であるが、それでも一定の誤差を想定する必要がある。この誤差による影響として、(i) ビーコン送出タイミングの揺らぎによるフレーム衝突、および、(ii) ビーコン送出時に送信すべきノードがスリープしている場合にはデータフレーム送信の失敗、が発生しうる。前者は、

ネットワーク内の送信データレートに対してリンクの通信速度が十分に速ければ、ビーコン間の時間を十分に長くとれるため、解決できる。後者は、送信ノードが誤差を見込んで早めにウェイクすることで解決できる。具体的な同期誤差量はノード構成やネットワークに依存して異なるが、同期誤差の影響を吸収することは、上記のように容易である。なお、本論文の評価においては、5.1.2項で述べたようにデータレートが通信容量に対して十分小さくなるようなセンシング間隔を用いており、また、 $t_{xwait} = 1$  [秒] とすることにより、各ノードは起動してからビーコンを受信するまで1 [秒] の待機時間を許容できるように設定することで、同期誤差を吸収できる設定となっている。

本論文の評価結果から、提案手法では、葉ノードの寿命に対して中継ノードのノード寿命がかなり短くなることが分かった。中継ノードの寿命は、データのセンシング間隔と子孫数の影響を大きく受ける。シンク付近のノードの子孫数は急激に大きくなるため、これらの寿命が極端に短くなり、管理上のボトルネックになる可能性がある。この問題は、適切な対策で回避できる。たとえば、直線状に電源に接続したノードを配置し、これらすべてをシンクノードとすると、データが1点に集まることによる子孫数の偏りを避けられる。提案手法では、シンクノードを特別なノードとして扱わず、他のノードと同じ動作を行うため、このような複数のシンクノードが存在するネットワークにもそのまま適用が可能である（シンクノードが複数ある場合でも、制御メッセージの送信数を含めて提案手法の動作は変わらないことに注意したい）。また、バッテリー残量が少ない中継ノードがある場合には、これが葉ノードになるように、自律的に配送木を再構築する仕組みを組み込んでもよい。後者のような、管理コストを低く抑えながらもネットワークの寿命を延伸するような経路制御の仕組みは、今後の課題の1つである。

最後に、実用を考えるならば、バッテリーを交換すべきノードをどうやって発見するかを考える必要がある。このためには、各ノードの位置を正確に把握することが必要である。センサノードの位置特定手法は数多く提案されており、GPSを電波強度等により補助して高い精度を実現する手法や、GPSを備えた移動ノードによるセンサノードの位置推定法等、様々な手法が適用可能である [21]。商用化された技術としては、Differential GPSやRTK-GPS等を用いると、2 [m] 以内の実用的な誤差で位置を特定できる。提案手法を利用する場面や条件に合わせてこれらの手法を検討し、適切な方法を用いることで解決可能であろう。

## 7. おわりに

本論文では、比較的少数のノードのバッテリーを定期的に交換することで10年以上の運用が可能で、インフラとしての無線センサネットワーク構築技術を提案した。提案手

法は、消費電力性能に優れる受信ノード主導型 MAC プロトコルの 1 つである RC-MAC を拡張し、状態遷移を導入することで、自律的に管理コストの低い配送木を構築すること、消費電力の低い効率的なデータの集約を両立できる。代表的な研究用センサノードの 1 つである MICA2 を想定した電力モデルに基づいて消費電力を評価すると、配送木における葉ノードは 5 年～15 年程度の長い寿命を達成できることが明らかになった。また、提案手法が構築する配送木によって、バッテリー交換が必要な中継ノードの数を大幅に低減できることが明らかになり、管理コストを低減させることができることを示した。これにより、10 年以上の運用が可能なインフラとしての無線センサネットワークの実現に向けて、その実現可能性を示すことができたと考えている。

今後の課題として、実際にセンサネットワークを動作させた場合に、どの程度の頻度でリンク切断やノード故障が発生するかを考慮できていない点があげられる。将来的には、実機実験等による確認が必要と考えている。また、実運用にあたっては、シンクノードに集積されたデータからノード故障やリンク切断等の問題を早期検出し、頻繁な配送木再構築による電力の消費を防ぐための運用ツールの開発も重要である。さらに、提案手法を発展させて、一部の中継ノードのバッテリー残量が少なくなった場合に柔軟に配送木を再構築し、管理コストを抑えつつネットワーク全体の寿命を延ばす方法を開発することも、実運用に資する重要な課題の 1 つ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] Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proc. 21st Conference on Computer Communications (INFOCOM'02)* (2002).
- [2] van Dam, T. and Langendoen, K.: An Adaptive Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proc. 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, pp.171–180 (2003).
- [3] Polastre, J., Hill, J. and Culler, D.: Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, *Proc. 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*, pp.95–107 (2004).
- [4] Buettner, M., Yee, G., Anderson, E. and Han, R.: X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks, *Proc. 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)* (2006).
- [5] 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. 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'08)*, pp.1–14 (2008).
- [6] Huang, P., Wang, C. and Xiao, L.: RC-MAC: A Receiver-Centric MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks, *Proc. 18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS'10)* (2010).
- [7] Huang, P., Xiao, L., Mutka, M.W. and Xi, N.: The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.15, No.1 (2013).
- [8] Park, C. and Chou, P.H.: Ambimax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-supply Wireless Sensor Nodes, *Proc. IEEE SECON'06* (2006).
- [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, *Proc. 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)*, pp.407–415 (2006).
- [10] Sudevalayam, S. and Kulkarni, P.: Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.13, No.3, pp.443–461 (2011).
- [11] 猿渡俊介, 森戸 貴, 南 正輝, 森川博之: バッテリレス無線センサネットワークと省メモリ型データ収集プロトコル, *情報処理学会論文誌*, Vol.55, No.1, pp.1–14 (2014).
- [12] Luo, D., Zhu, X., Wu, X. and Chen, G.: Maximizing Lifetime for the Shortest Aggregation Tree in Wireless Sensor Networks, *Proc. 30th Conference on Computer Communications (INFOCOM'11)* (2011).
- [13] 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. 31st Conference on Computer Communications (INFOCOM'12)* (2012).
- [14] Gnawali, O., Fonseca, R., Jamieson, K., Moss, D. and Levis, P.: Collection Tree Protocol, *Proc. 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09)* (2009).
- [15] Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D. and Anderson, J.: Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring, *Proc. 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (WSNA'02)*, pp.88–97 (2002).
- [16] Shnayder, V., Hempstead, M., Chen, B., Allen, G.W. and Welsh, M.: Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications, *Proc. 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)* (2004).
- [17] Perla, E., Catháin, A.Ó., Carbajo, R.S., Huggard, M. and Mc Goldrick, C.: PowerTOSSIM z: realistic energy modelling for wireless sensor network environments, *Proc. 3rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks (PM2HW2N'08)*, pp.35–42 (2008).
- [18] available from <http://www2.ece.ohio-state.edu/~bibyky/ee582/telosMote.pdf> (accessed 2015-05-06).
- [19] Hill, J.L. and Culler, D.E.: MICA: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks, *IEEE Micro*, Vol.22, No.6, pp.12–24 (2002).
- [20] IEEE802.15.4 Standard (2011), available from <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> (accessed 2015-05-06).
- [21] Han, G., Xu, H., Duong, T.Q., Jiang, J. and Hara, T.: Localization Algorithms of Wireless Sensor Networks: A Survey, *Telecommunication Systems*, Vol.52, Issue 4, pp.2419–2436 (2013).

## 推薦文

本論文では、受信ノード主導型の低消費電力な MAC プロトコルである RC-MAC を拡張することで、10 年以上の長期運用を比較的低い管理コストで実現するセンサネットワーク実現技術を提案している。RC-MAC をベースにした受信ノード主導型 MAC プロトコルにおいて配送木構築状態と定常状態を分離し葉ノードの役割を考慮して省電力を実現する方式の提案には高い新規性が認められるとともに、本論文では、提案方式のシミュレーション評価結果において、「実用に関する議論」まで踏み込んで考察が行われている等、高い有用性も認められる。以上の理由から、本論文を推薦論文に推薦する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 重野 寛)



小島 祥平 (学生会員)

1992 年生。2014 年和歌山大学システム工学部卒業。2016 年 2 月現在、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。



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。本会シニア会員。電子情報通信学会、日本データベース学会、IEEE 各会員。