

受信ノード主導型 MAC プロトコルに基づいた WSN の ビーコン削減による長寿命化

横谷 晟人^{1,a)} 吉廣 卓哉^{2,b)}

概要：バッテリー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の実用化を進める技術として、盛んに研究されている。無線センサネットワークでは、多くの場合にバッテリーによる駆動が要求されるため、長期にわたり安定して実運用するには、省電力化によりセンサノードを長寿命化することが必要である。我々の研究グループでは、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受信ノード主導型 MAC プロトコルを拡張することで、大幅にネットワーク寿命を延ばす MAC 及び経路制御プロトコルの提案を行っている。しかしながら、従来の手法ではネットワーク障害発生に備えた代替経路を確保するために定期的に通信を行う必要があるなどの課題があった。本研究では、不必要な通信を発生させることなく代替経路を自律的に選択できるように、従来手法を拡張する。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、ネットワークが連続して動作できる時間を延長する。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。

1. はじめに

あらゆる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 (WSN: Wireless Sensor Network) は、IoTの実用化を進める技術として、盛んに研究されている。WSNでは、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、防災や農業といった広い分野で応用が検討されている [1]。

WSN に特有の点として、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、省電力化によりセンサノードを長寿命化することが必要である。そこで、近年では IEEE802.15.4[2] といった WSN に適応する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て、30分程度の間隔でデータを生成してシンクノードに集約する WSN では、ノード寿命は長くても 1~2 年程度である。WSN を社会基盤として安定して利活用するため

には、乾電池等の現実的な電源により、敷設してから 5 年以上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 [3] 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 プロトコルのひとつである RI-MAC[5] を拡張し、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。ノードの動作状態として「定常状態」と「配送木構築状態」の 2 状態を導入し、定常状態では葉ノードにおける主な電力消費要因である定期的なビーコン送信を省くことにより、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、常時送受信が可能な配送木構築状態において、電池交換を要する中継ノード数をできるだけ削減する配送木を自律的に生成することで、WSN の管理における主要なコストの一つである電池交換に要するコストを低減している。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直接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、トポロジ変化時にも自律的に配送木を修復することが可能である。

しかしながら、小島らの手法では、ノード故障が一箇所で発生した場合でも、これが配送木に沿ってネットワーク全体に伝達され、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

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科, 和歌山市栄谷 930 番地
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

² 和歌山大学システム工学部, 和歌山市栄谷 930 番地
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

a) m.yokotani@fw.ipsj.or.jp

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

あるため、ネットワーク全体で電力が浪費されることが問題である。さらには、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。

そこで、著者らは小島らの手法に対して、初期の配送木構築時に、各葉ノードが親子関係ではない隣接ノードを1つ「連絡ホップ」として選択して、代替経路を確保することで、局所的に配送木の再構築をできるような拡張を行った[4]。しかしながら、本手法では、各葉ノードは次ホップとなる中継ノードのほかに、隣接ノードに対して経路を確保しておくために定期的なメッセージ交換(Keep Aliveメッセージ)が必要となり、本来不要であるデータフレームのやり取りが発生してしまうという課題がある。

よって、本研究では、配送木の局所的な再構築を行う手法を改良する。初期配送木構築時に、それぞれのノードは隣接ノードの隣接情報を収集することで、トポロジ変化発生時に制御メッセージを受信できるようにビーコン送信を省略しない「予備中継ノード」となるかどうかを自律的に判断するようにする。従来手法のように経路を確保する必要がないため不要な通信が発生することはない。

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的な再構築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て電力枯渇によるノードの停止ができるだけ発生しないよう拡張する。

また、ネットワークに属するノードのバッテリー残余電力が枯渇するまでの期間をネットワーク寿命としてシミュレーション評価を行う。

2. 従来手法の概要

2.1 連絡ホップの選択

小島らの手法では、葉ノードはビーコン送信を省略することからデータフレームを受信することができず、次ホップに障害が発生したノードは親子関係にない隣接葉ノードを新たな次ホップとして選択することができない。そこで、我々の従来手法[4]では、初期配送木構築時に各葉ノードが隣接する親子関係にないノードを1つ「連絡ホップ」として選択し、代替経路として保持する拡張を行った。

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 $par(n_x)$ 、及び次々ホップ $par(par(n_x))$ 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、 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る。

連絡ホップに選択されたノード 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。全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。

2.2 連絡ホップを使用した配送木の局所再構築

ノード故障発生等の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、配送木再構築のため常時送受信が可能な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、自分の次ホップに障害が発生したと判断すると、配送木構築状態に遷移する。配送木構築状態となったノードは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 $par(n)$ 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。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 は、シンクまでの経路が確保されている隣接ノード n_e (以後、出口ノードと呼ぶ)を発見すると、出口ノードが連絡ホップもしくは中継ノードであれば、 n_e を次ホップ $par(n_x)$ として選択する。その後、フレームの交換によって順次出口ノードから到達可能なノードは全て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、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、次ホップのトポロジ変化フラグ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トポロジ変化フラグなくなれば、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し、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。

3. 提案手法の概要

3.1 予備中継ノードの選択

各葉ノードが親子関係のない隣接ノードを「連絡ホップ」として選択することで、トポロジ変化時に備えた代替経路を確保する従来手法では、経路の維持のため Keep Alive の定期的な送受信が必要であり、最大限の省電力化を目指す葉ノードにとって本来不要な通信が発生してしまう。そこで、経路を確保して維持するのではなく、可能な限り多くの親子関係のない葉ノードに隣接するノードが自律的に従来手法における準中継ノードのような動作を行うノード「予備中継ノード」となるように変更する。

初期配送木構築中、各ノード n は定期的ブロードキャストする制御メッセージに現在の次ホップ $par(n)$ の ID を含めて送信する。隣接ノードから制御メッセージを受信したノード n_r は、隣接ノードの次ホップ集合 $N_{next}(n_r)$ を生成する。 $N_{next}(n_r)$ のうち、 n_r の次々ホップの子孫 $D(par(par(n_r)))$ に含まれないノードの数を「カバー中継ノード数」 $cover(n_r)$ として、制御メッセージに含めてブロードキャストする。また、隣接葉ノードもしくは自身のうち最大のカバー中継ノード数を持つ「最大カバー中継ノード」 $maxcover(n)$ の ID を求めて制御メッセージに含める。なお、カバー中継ノード数は、親子関係のない中継ノードを次ホップに持つノードといくつ隣接しているのかを示しており、この値が大きいほど多くの親子関係のない隣接ノードのトポロジ変化に対応することができることを意味する。

制御メッセージの交換を繰り返して隣接ノードのカバー中継ノード数、最大カバー中継ノード ID を収集したのち、各ノード n は自身が「予備中継ノード」となるべきかを判断する。ノード n の隣接ノード集合 $N(n)$ に含まれるノード n_x のうち、 $n_x \in D(par(par(n)))$ かつ $maxcover(n_x) \in N(n)$ を満たす、 $N(n)$ 中でカバー中継ノード数 $cover(n_x)$ が最大のノードを n_{max} とする。このとき、自身のカバー中継ノード数 $cover(n)$ と n_{max} のカバー中継ノード数 $cover(n_{max})$ を比較して $cover(n) > cover(n_{max})$ のであれば、ノード n は「予備中継ノード」となるべきであると判断し、定常状態移行後は制御メッセージ受信のために定期的にビーコンを送信するようになる。

上記のように最大カバー中継ノード ID を交換して「予備中継ノード」となるべきかを判断することで、予備中継ノードを一定の間隔を確保しながら、できるだけ少なくなるように配置することができる。

3.2 残余電力による葉ノードへの遷移

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

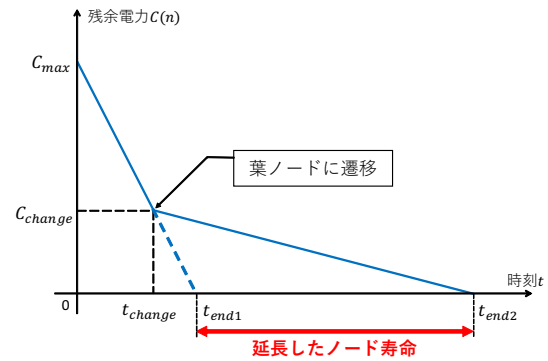


図 1 残余電力による葉ノードへの遷移

閾値 C_{change} を下回ると、一定時間全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う。 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、3.3 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の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、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 1 を用いて説明する。図 1 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。

3.3 配送木の再構築

ノード故障発生時や、残余電力の減少に伴う中継ノードの葉ノードへの遷移に伴うトポロジ変化時には、予備中継

ノードを用いて局所的に配送木を再構築する。2.2節で述べた局所再構築の手法と同様に、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 $par(n)$ に障害が発生したと判断すると、配送木構築状態に遷移する。配送木構築状態となったノードは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 $par(n)$ 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。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 は、シンクまでの経路が確保されている、制御メッセージを受信可能な隣接予備中継ノードもしくは中継ノード n_e (以後、出口ノードと呼ぶ) を発見すると、 n_e を次ホップ $par(n_x)$ 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、何もしなくて良い)。その後、フレームの交換によって順次出口ノードから到達可能なノードは全て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、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。

また、ある子ノード n_c に障害が発生した、もしくは残余電力が減少したことを検出した n_c の次ホップノード $par(n_c)$ は、送信するビーコンフレームに一定時間フラグを立てることで、 $par(n_c)$ の子ノードに障害が発生したノードが存在することを $par(n_c)$ からのビーコンを受信した子ノード $children(par(n_c))$ に対して伝達する。フラグが立ったビーコンを受信した $children(par(n_c))$ に属する葉ノードは、一定時間中継ノードとして動作する。これにより、 n_c を次ホップに選択していたノードが、 $children(par(n_c))$ に属するノードを新たな次ホップとして選択する候補に加えることができるようにする。

n_c を次ホップに選択していたノードが $children(par(n_c))$ に属するノードを次ホップに選択できるようにすることで、親子関係のないノードを次ホップに選択する際に比べ、より小さな配送木の変更のみで再構築を行うことが可能になる。

4. 評価

4.1 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

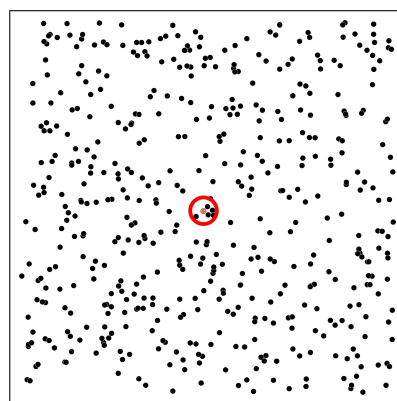


図 2 ノード配置例 ($n = 500$)

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する。受信ノード主導型 MAC プロトコルと経路制御の組み合わ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、消費電力を均等化するような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、3章の提案手法の MAC 層およびネットワーク層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。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[6] を用いた。

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動向を基に、現在販売されているハードウェアで実現できる現実的な性能を想定して定めた。これらのパラメータから求めた消費電力モデルについて 4.3 節で説明する。

4.2 評価シナリオ

正方形フィールドにセンサ端末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] 四方のフィールド上にノードを図 2 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 2 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毎にセンサによる測定を行い、それらの値をシンクノードに集める。シミュレーションのパラメータを表 1 に示す。なお、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。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。

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、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、

表 1 シミュレーションパラメータ

変数	意味	値
C_{batt}	バッテリー容量	2500[mAh]
V	動作電力	3[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	1800[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_{xwait}	送信時のビーコン待受時間	100[ミリ秒]
$t_{backoff}$	最大バックオフ時間	2.56[ミリ秒]
n	構成ノード数	250,500,1000[個]
C_{slimit}	中継ノードとして選択可能な最低残余電力	700[mAh]
C_{change}	中継ノードとして動作可能な最低残余電力	500[mAh]

表 2 消費電力諸元

状態	時間 [秒]	電流 [mA]
動作中	-	I_{active} 4.12
スリープ	-	I_{sleep} 1.10×10^{-3}
起動電力	t_{wake} 1.0×10^{-6}	I_{wake} 4.12
センシング	t_{sense} 0.24	I_{sense} 0.21

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度に、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ネットワーク全体の均等な電力消費が期待できる。

評価指標としては、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。

4.3 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 $Vl_{data}t_{txb}(I_{txb} + I_{active})$ であり、制御メッセージの送信にかかる電力は $Vl_{control}t_{txb}(I_{txb} + I_{active})$ 、ACK フレームの送信にかかる電力は $Vl_{ack}t_{txb}(I_{txb} + I_{active})$ であるから、送信電力は次式 (2) となる。

$$E_{tx} = NUM_{Dtx}Vl_{data}t_{txb}(I_{txb} + I_{active}) + NUM_{Ctx}Vl_{control}t_{txb}(I_{txb} + I_{active}) + NUM_{Atx}Vl_{ack}t_{txb}(I_{txb} + I_{active}) \quad (2)$$

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 $Vl_{data}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{active})$ であり、制御メッセージの受信にかかる電力は $Vl_{control}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{active})$ 、ACK フレームの受信にかかる電力は $Vl_{ack}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{active})$ であるから、受信電力は次式 (3) となる。

$$E_{rx} = NUM_{Drx}Vl_{data}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{active}) + NUM_{Crx}Vl_{control}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{active}) + NUM_{Arx}Vl_{ack}t_{rxb}(I_{rxb} + I_{active}) \quad (3)$$

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 $E_{wait} = Vt_{wait}I_{active}$ となる。

E_{wake} : スリープからの復帰における消費電力は $E_{wake} = Vt_{wake}I_{wake}NUM_{wake}$ 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 $E_{sleep} = Vt_{sleep}I_{sleep}$ となる。

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

以上のようにして計算された消費電力量 E を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当てはめることで、消費電力を計算する。なお、本評価ではその他の電力損失等は考慮しないものとする。

4.4 評価結果

表3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3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3に示す。

表3, 図3のシミュレーション結果より、全ての構成ノード数 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。 $n = 500$ の場合にはネットワーク寿命を2倍以上延長し、構成ノード数 $n = 1000$ では、ネットワーク寿命を3倍以上延長できていることが確認できた。

構成ノード数が増えるにしたがって比較手法の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伴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。提案手法においても構成ノード数の増大に伴って同様に転送負荷が増大していると考えられるが、提案手法では構成ノードの増大に伴ってノード密度が大きくなることで、代替中継ノードをより多く確保できるようになることから、性能が向上していると考えられる。

次に、提案手法による配送木の再構築の例を示す。図4は再構築前の配送木 ($n = 500$) の一部、図5は再構築後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 (ノード ID 0) 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4の赤丸で示した中継ノード (ノード ID 132) 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5の赤矢印で示すように異なるノード (ノード ID 404) 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6および図7に $n = 500$ 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 1250[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。

図6の提案手法において、残余電力の大きいノードは葉ノードであり、ごく少数の中継ノードであったノードのみ残余電力が小さくなっている。そのため、提案手法ではごく少数のノードのみを定期的に交換するだけで、葉ノードの寿命到達時までネットワークの運用を継続することができると考えられる。これに対して、図7に示す比較手法では、大多数のノードの残余電力が平均的に低下していることから、バッテリー枯渇ノードが継続的に高頻度で発生する

表3 シミュレーション結果

	構成ノード数 n		
	250	500	1000
提案手法	4.027	5.779	5.748
比較手法	3.337	2.370	1.593

(単位: 年)

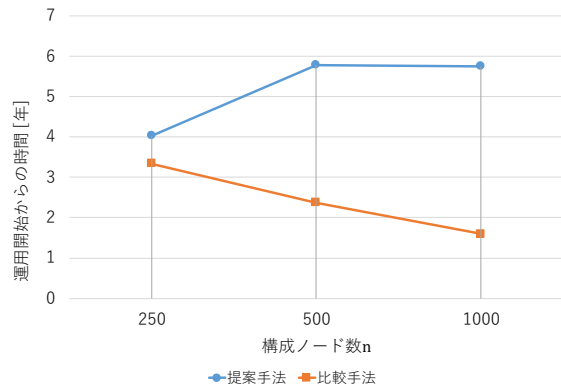


図3 シミュレーション結果

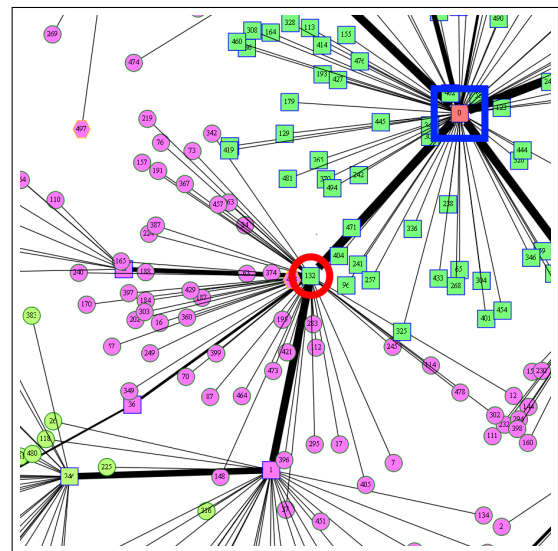


図4 再構築前の配送木の一部 ($n = 500$)

ことが考えられ、運用を継続するためには高い管理コストが必要となる。

5. おわりに

本研究では、小島らの研究におけるノード故障等のトポロジ変化時に配送木を再構築する問題を、予備中継ノードを用いた経路制御手法を組み合わせることで解決した。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で、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。

さらに、現実的なハードウェア構成を考慮した消費電力モデルを用いてシミュレーションを行った結果、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

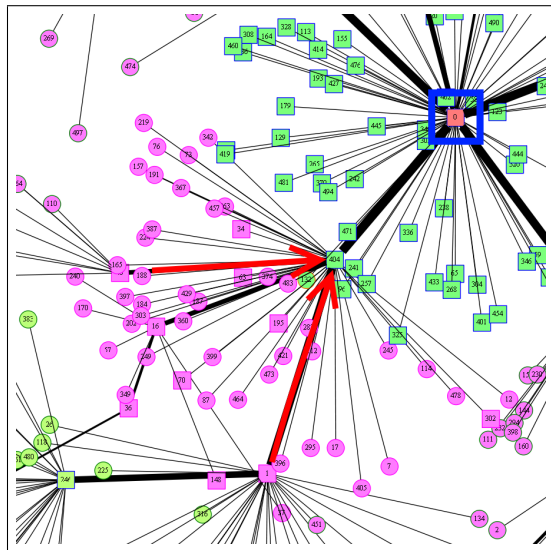


図 5 再構築後の配送木の一例 ($n = 500$)

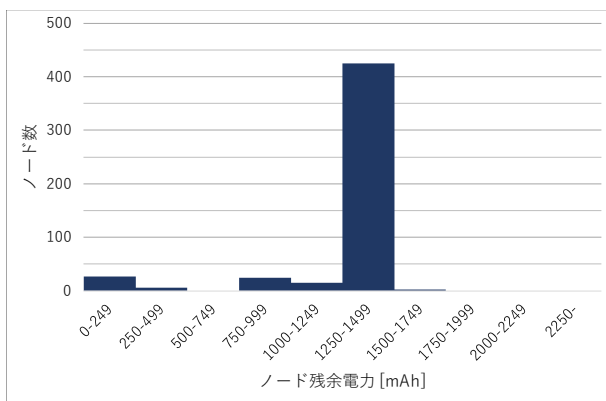


図 6 提案手法ネットワーク寿命到達時のノード残余電力 ($n = 500$)

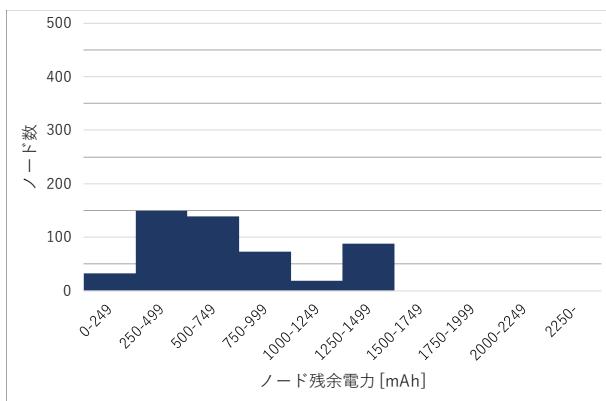


図 7 比較手法ネットワーク寿命到達時のノード残余電力 ($n = 500$)

した。また、無線センサネットワークの管理コストを比較手法を用いたネットワークに比べて大幅に削減することができる可能性を示した。今後は、パラメータの設定による影響やノードの交換考慮したネットワークの性能評価や、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の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] 横谷晟人, 吉廣卓哉: “受信ノード主導型 MAC プロトコルのピーコン削減に基づいた長寿命センサネットワーク,” 第 24 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, pp.92-101 (2016).
- [5] Y. Sum, O. Gurewits, and D. B. Johnson: *RI-MAC: A Receiver-initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks*, In Proc. of SenSys '08, pp.1-14 (2008).
- [6] P. Gupta and P. Kumar: *The Capacity of Wireless Networks*. IEEE Transaction on Information Theory, Vol.46, No.2, pp.388-404 (2000).