

低管理コストセンサネットワークにおける 障害発生時の部分的な配送木再構築手法

横谷 晟人¹ 吉廣 卓哉²

概要: 無線センサネットワークを長期にわたり安定して実運用するには、バッテリーによる駆動が要求されることが多いセンサノードの、省電力化による長寿命化と、電池交換等の管理に係るコストの低減が必要である。この目的を達成するためのセンサネットワーク構築手法として、小島らにより「低管理コストセンサネットワーク」が提案されている。しかし、低管理コストセンサネットワークでは、ノード故障等に起因するトポロジ変化が配送木のある一か所で発生した際に、配送木に属する全てのノードによって配送木が再構築されてしまう。大規模なネットワークになるほど電力消費の大きい配送木の再構築が行われる可能性が高くなることから、低管理コストセンサネットワークはスケーラビリティの問題がある。本研究では、低管理コストセンサネットワークにおいて、配送木の再構築に要する制御メッセージを、隣接ノードに送信するための代替経路をあらかじめ確保し、ノード故障等に起因するトポロジ変化発生時に、次ホップが変わるノード数を最小化して局所的に配送木を修復できるような、経路制御プロトコルおよび、MACプロトコルの拡張について提案する。

1. はじめに

近年、無線通信機能と各種センサを搭載した小型の機器(センサノード)を用いてネットワークを構成し、各センサが取得したデータを無線マルチホップ通信を用いて収集する無線センサネットワーク(WSN)の研究が進められている。これまでセンサを設置することが困難であった場所でも柔軟に設置することが可能であることから、防災や製造業といった広い分野で応用が進んでいる[1]。

無線センサネットワークの他の無線マルチホップ通信にはない特徴として、各センサノードが外部電源に接続されているとは限らず、多くの場合バッテリーによる駆動が要求される点がある。無線センサネットワーク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]といった無線センサネットワークに適応させた省電力な通信規格が開発されている。しかしながら、無線センサネットワークを社会において実運用する上で望ましいとされる10年以上の安定運用は、現在のプロトコルでは困難である。

そこで、ノードの省電力化に加えて、電池交換等の管理

に係るコストを低減することで、10年以上の安定運用を達成する無線センサネットワーク構築手法として、小島らによって「低管理コストセンサネットワーク」が提案されている[3]。しかしながら、低管理コストセンサネットワークでは、ノード故障等に起因するトポロジ変化が、配送木のある一か所で発生した際に、配送木に属する全てのノードにより配送木が再構築される仕様となっている。これにより、大規模なネットワークになるほど電力消費の大きい配送木の再構築が行われる可能性が高くなり、低管理コストセンサネットワークはスケーラビリティの問題が発生する。そこで、省電力化の観点から、トポロジ変化が発生した周辺のみで配送木の再構築を行うようにすることで、配送木の再構築を行うノード数を抑えることが望ましい。

そこで、本研究では、小島らによる低管理コストセンサネットワークを拡張し、ノード故障等の障害に起因するトポロジ変化発生時に、部分的に配送木の再構築を行うことで、電力消費を抑えながら配送木を修復できるようにする。これを実現するため、トポロジ変化時に代替経路を探索し、局所的に配送木を修復できるようにするための経路制御プロトコルおよびMACプロトコルの拡張を提案する。また、既存研究による、配送木全体が再構築される配送木再構築処理に比べて、配送木の再構築に必要なノードをどの程度低減できるかを評価する。

本論文は以下のように構成される。第2章で無線セン

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
和歌山県和歌山市栄谷 930 番地

² 和歌山大学システム工学部
和歌山県和歌山市栄谷 930 番地

サネットワークや無線センサネットワークに使用される MAC プロトコルなどの基礎となる関連研究を示す。第 3 章では、既存研究である低管理コストセンサネットワークの概要と、その問題点について述べる。第 4 章では、既存研究に対してデータ配送木の部分的な再構築を行うことができるよう拡張を行う提案手法について説明する。第 5 章では、提案手法の性能を評価するため、シミュレーションプログラムに提案手法を実装し、既存研究と比較を行った結果を述べる。第 6 章で本研究をまとめる。

2. 関連研究

2.1 無線センサネットワーク

無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network, WSN) とは、外界の情報をデータ化する各種センサ類と無線通信機器を組み合わせた小型の端末機器 (センサノード, 図 1) を用いて無線ネットワークを構築し、各センサノードでのセンシングデータをマルチホップ通信を用いて収集するシステムである。1990 年代に提唱された米国防高等研究計画局による、軍事、防災、環境を目的とした「Smartdust」構想 [4] を発端として研究が盛んとなり、機器の高機能化かつ低価格化が進んだことによって、現在ではユビキタスネットワークや IoT (モノのインターネット) の重要な構成要素として、防災、製造、物流といった広い分野での活用、研究が進められている [1]。

多くの場合、センサノードは、安定した外部電源を確保することができない環境に配置される。そのためバッテリーによる電力で駆動することが多く、長期にわたって安定してセンサネットワークを運用するためには、センシングデータ送受信を省電力化することでセンサノードの消費電力を削減する必要がある。近年では IEEE802.15.4[2] 等の無線センサネットワークのための通信規格が開発されており、さらに、LEACH[5] などの経路制御の改善による手法や、X-MAC[6], RI-MAC[7] などの MAC プロトコルの改善による手法が多数提案されている。

また、無線センサネットワークでは、集約されるセンシングデータの利用を前提とするため、各センサノードからシンクノードへのデータ転送が可能な限り途切れないことが重要である。このため、あるノードが故障した等のトポロジ変化が発生した際に、他のノードからのデータ集約に対する影響を抑えられるよう、迅速に経路木を再構築する手法の確立が、無線センサネットワークを広く利用できるようにする上で重要である。

2.2 無線センサネットワークの MAC プロトコル

2.2.1 無線センサネットワークの MAC プロトコル

無線センサネットワークでは、送受信するデータ量はそれほど大きくないことが多く、送受信自体に要する電力量はそれほど大きくない。そのため、無線 LAN で用いられる



図 1 センサノードの一例 (TelosB[8])

ような大容量の通信に適した MAC プロトコルを用いた場合、電力消費の多くを受信待機期間が占める。そこで、センサノードを定期的スリープ状態として受信待機期間の電力消費を抑え、スリープ状態からウェイクした時に通信を行うことで、無線センサネットワークに適応させた MAC プロトコルの研究が進められている。

これらの無線センサネットワークに適した MAC プロトコルは、大きく「送信ノード主導型 MAC プロトコル」と「受信ノード主導型 MAC プロトコル」の 2 種類に分類できる。

2.2.2 受信ノード主導型 MAC プロトコル

受信ノード主導型 MAC プロトコルは、データフレームを受信するノードが、データフレームを送信するノードに対して、送信タイミングや送信順序を指定する MAC プロトコルである。長時間のプリアンプル送信や、同期フレームの送受が必要ないことから、X-MAC 等の送信ノード主導型 MAC プロトコルに比べ低消費電力で効率が良い。現在、RI-MAC[7] や RC-MAC[9] 等が提案されており、本研究の提案手法や低管理コストセンサネットワークの基となる MAC プロトコルである。

RI-MAC におけるデータフレーム送受信手順を図 2 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、データの送信をキャンセルすることで、データフレームの衝突を回避する。図 2 では、 n_{s1} のバックオフ時間が n_{s2} のバックオフ時間比べて短いため、 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可能である。

RI-MAC を拡張した RC-MAC では、受信ノードが ACK

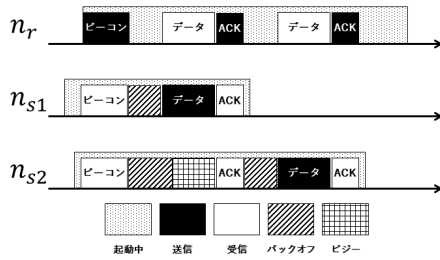


図 2 RI-MAC 送受信手順

フレームにおいて、「次にバックオフ待機なしにデータフレームを送信するノード」を指定し、送信順序を制御して効率良くデータを受信することが可能となる。なお、ACK フレームにより指定されたノードに送信するデータが無い場合など、データフレームの送信を即座に開始しない場合は、他の送信ノードが再びランダム時間の待機を開始する。

受信ノード主導型 MAC プロトコルは、送信ノード主導型 MAC プロトコルと比較して電力消費量が小さく済むが、やはり定期的なビーコン送信が占める消費電力の割合が大きい問題がある。

3. 低管理コストセンサネットワーク

3.1 概要

さらなるセンサノードの長寿命化を達成しながら、定期的に電池交換やノード交換が必要な、データ転送を行うノードの数を削減したネットワークを形成することで、長期運用が可能な管理コストを抑えた無線センサネットワークを構築する試みとして、小島らによって「低管理コストセンサネットワーク」が提案されている [3]。低管理コストセンサネットワークは、RC-MAC を改良した MAC プロトコルと、自律分散的に配送木を構築する経路制御プロトコルを組み合わせることにより、管理コストの低減を達成する。低管理コストセンサネットワークには次のような特徴がある。

- 葉ノードを省電力化する MAC プロトコルにより、運用中の電池交換を不要にする。
- 経路制御プロトコルにより、定期的に電池交換を要する中継ノードの数が少ない配送木を構築する。
- MAC プロトコルと経路制御プロトコルを組み合わせることによって 10 年以上の長期運用を低コストに実現する。

3.2 MAC プロトコル

まず、低管理コストセンサネットワークの MAC プロトコルについて説明する。マルチホップ通信でシンクノードへセンシングデータを送信する場合、配送木の末端に位置するノード（葉ノード）はセンシングデータを定期的に生成してデータ送信先ノード（次ホップノード）に送信するだけでなく、他のノードが生成したデータを転送する必要

はない。そこで、他のノードからのデータ受信のために、RC-MAC において、各ノードが定期的に送信するビーコンを停止する。これにより、葉ノードは、次ホップノードからの ACK フレーム以外の一切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、10 年以上電池交換なしで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、RC-MAC に準じて、定期的にビーコンを送信する。

また、低管理コストセンサネットワークでは、自律分散的に配送木を構築するために周辺ノードへの制御メッセージのブロードキャストが必要となるが、RC-MAC ではブロードキャスト通信をサポートしていない。そこで、「定常状態」と「配送木構築状態」の 2 状態を新たに導入することにより、これを実現する。「定常状態」では先述の通り葉ノードはビーコン送信機能を停止し、他ノードからのデータを転送するノード（中継ノード）は RC-MAC に準じて動作する。「配送木構築状態」では、RC-MAC と同様に定期的なビーコンの送信を行うが、ノードは常に受信待機状態となり、スリープ状態には移行しない。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、制御メッセージのブロードキャストが可能となる。配送木構築状態は常に受信待機状態であるため、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定常状態に遷移することとする。

以上の低管理コストセンサネットワークにおけるノード状態ごとの動作を表 1 にまとめる。

3.3 経路制御プロトコル

次に、経路制御プロトコルについて説明する。低管理コストセンサネットワークでは、MAC プロトコルにより、定常状態において葉ノードは大幅に長寿命化された。しかしながら、中継ノードは RC-MAC に準じて動作するため、葉ノードに比べて寿命は短く、ネットワークを維持するには中継ノードの定期的なバッテリー交換が必要となると考えられる。経路制御プロトコルでは、バッテリー交換に要する管理コストを抑えるため、少数の中継ノードに通信を集中させることによって、中継ノードの数を削減するような配送木を構築する。

経路制御プロトコルは、ノードが配送木構築状態にあるときに動作する。まず、各ノードはシンクノードからのホップ数の把握を行う。初期状態では、シンクノード n_{sink} のみがシンクノードからのホップ数 $level(n_{sink}) = 0$ であり、他のノードはシンクノードからのホップ数が無限大 (∞) で初期化されている。ノード n_s は定期的に送信する制御メッセージに自身の持つシンクノードからのホップ

表 1 低管理コストセンサネットワークのノード状態ごとの動作

ノード状態	ノード種別	動作
定常状態	中継ノード	RC-MAC に準ずる（ビーコンタイミングで送受可能）
	葉ノード	RC-MAC から定期的なビーコン送信を停止（送信のみ可能）
配送木構築状態	（全ノード）	常時スリープせず受信待機（常に送受可能）

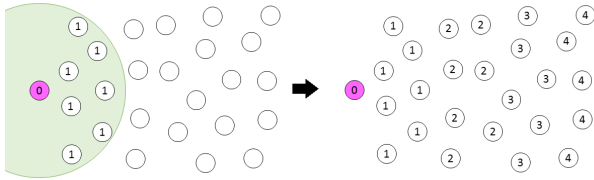


図 3 シンクノードからのホップ数把握

次ホップの決定処理 $update_{next}()$

```

/*  $max_{children}(N)$  はノード集合  $N$  のうち
   子孫数が最大のノードを表す */
/*  $N_n$  は隣接ノード集合を表す */
if  $children(n_r) > 0$  then
     $N = \{n | n \in N_n, level(n_r) - level(n) = 1\}$ 
     $par(n_r) = max_{children}(N)$ 
else
     $N = \{n | n \in N_n, level(n_r) - level(n) \leq 1\}$ 
     $par(n_r) = max_{children}(N)$ 
end if
    
```

図 4 次ホップの決定処理

数 $level(n_s)$ 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、制御メッセージに含まれるシンクノードからのホップ数 $level(n_s)$ と n_r の持つシンクノードからのホップ数 $level(n_r)$ 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。図 3 は、シンクノードに近いノードから順にシンクノードからのホップ数が決定され、最終的に全てのノードがシンクノードからの正しいホップ数を把握することを表している。

シンクノードからのホップ数が決定されると、各ノードは次ホップの選択を行う。子孫数が最大の隣接ノードを各ノードが次ホップとして選択することで、データ転送を一部のノードへと集約させ、中継ノードとなるノードの数を削減する。配送木構築開始から一定時間経過後、全ノードが配送木構築状態から定常状態に移移することにより、経路制御プロトコルによる配送木構築処理が完了する。制御メッセージを送信するノード n_s は、制御メッセージにシンクノードからのホップ数 $level(n_s)$ に加えて、次ホップ ID $par(n_s)$ と、子孫ノード数 $children(n_s)$ を含める。以上の隣接ノード集合から次ホップを選択する処理を図 4 にまとめる。

また、図 5 を用いて、低管理コストセンサネットワークによる次ホップ選択を説明する。ノードの数字はシンクノードからのホップ数を表している。子孫ノードがある中継ノード E は隣接するシンクノードからのホップ数が 1 小

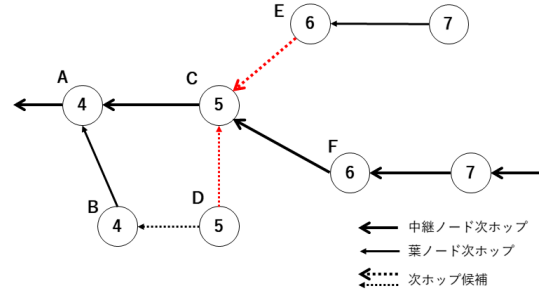


図 5 低管理コストセンサネットワークの経路制御プロトコルによる次ホップ選択

さい中継ノード C を次ホップとして選択する。子孫ノードが無い葉ノード D の次ホップの候補は隣接するノード B または C である。図 5 の場合は子孫ノード数が最大のノード C を次ホップに選択する。

3.4 低管理コストセンサネットワークの配送木再構築における問題

低管理コストセンサネットワークにおいて、運用中にノード故障が発生する等のトポロジ変化が発生した際の処理とその問題について説明する。

配送木構築が完了し、全ノードが定常状態となった後、ネットワーク運用中にノードが故障する等の障害が発生することによりネットワークの分断が発生することが考えられる。分断されたネットワークに属しているノードからはセンシングデータをシンクノードに収集することができなくなるため、配送木の再構築が必要である。低管理コストセンサネットワークでは、各ノードが次ホップを選択することで配送木が形成されているため、次ホップを適切に再選択することにより配送木を再構築できる。次ホップは、受信した制御メッセージの情報を用いて選択することから、トポロジ変化発生地点の周辺にあるノードは、制御メッセージを送受信できる配送木構築状態に移移しなくてはならない。

低管理コストセンサネットワークでは、トポロジ変化を検出した地点から、各送信フレームに用意されたフラグを用いて、配送木を辿りながらネットワークを構成する全ノードを配送木構築状態へと遷移させ、3 節のプロトコルに従って次ホップを各ノードが再選択することで、配送木が構築される。すなわち、ネットワーク全体が一度初期状態となることで、再構築が行われる。配送木構築状態にあるノードは常に受信待機状態であることから、消費電力量

が定常状態時に比べてかなり大きいため、次ホップを再選択する必要がないノードまで配送木構築状態へ遷移して、次ホップの再選択を行うことは、非常に電力の無駄が大きい。

これは、定常状態にある葉ノードに対して、次ホップ以外のノードから、フラグを用いて配送木構築状態へ遷移させることが難しいことが原因である。定常状態にある葉ノードは、他のノードからフレームを受信するために必要なビーコン送信機能を停止している。また、送信データ発生時のみ、次ホップの中継ノードが送信するビーコンに合わせてスリープ状態からウェイクし、データ送信を終了後即座にスリープ状態となるため、次ホップとして選択されていないノードから定常状態にある葉ノードに対して、何らかのフレームを送信することは困難である。次ホップもしくは子以外の隣接する中継ノードに対しては、ビーコンが送信されるのを受信待機状態で待機してコンテンションに参加することにより、RC-MACの動作に従ってフレームを送信することができる。しかしながら、低管理コストセンサネットワークの経路制御プロトコルでは中継ノードを可能な限り削減する経路木を構築することを目的としていることから、必然的に中継ノード間の物理的な距離が大きくなるため、障害発生ノードを次ホップとするノードの通信可能範囲内に中継ノードが存在する保証はできない。ゆえに、低管理コストセンサネットワークでは、トポロジ変化発生地点の周辺のノードを配送木構築状態へ遷移させるために、配送木を辿って全ノードを配送木構築状態へと遷移させる必要がある。

配送木の一部を示す図6を用いて、低管理コストセンサネットワークの配送木再構築時の配送木構築状態への遷移の流れを説明する。ノードの数字はシンクノードからのホップ数を表している。また、シンクノードからのホップ数が0のノードはシンクノードである。ノードCにおいて障害が発生した場合、ノードD、Eは次ホップを再選択する必要がある。しかしながら、ノードDに隣接するノードHは葉ノードであり、配送木構築状態へと遷移させるためのフラグ付きフレームを直接送信することは出来ない。よって、Hを配送木構築状態へ遷移させるためには、Cに障害が発生したことを検出したノードBから、A、F、G、Hと配送木を辿りながら配送木構築状態へ遷移させる必要がある。

また、仮に各ノードの単位時間当たりの故障発生確率が全てのノードで P_{break} 、ネットワークに属するノード数を n とすると、単位時間当たりのネットワーク全体での故障発生確率は $1 - (1 - P_{break})^n$ で表される。すなわち、ネットワークの規模が大きくなるにつれ、ネットワーク全体での単位時間当たりの故障発生確率は大きくなり、故障発生回数が増大する。このとき、故障発生ごとにネットワーク全体を再構築する手法ではノードの配送木構築状態への

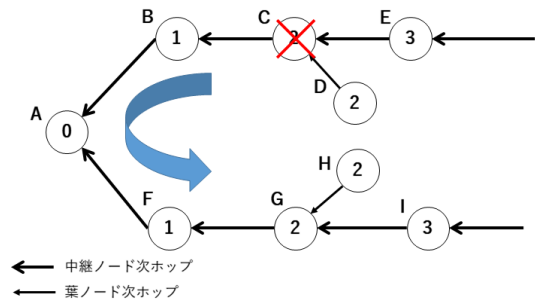


図6 障害発生時の配送木構築状態への遷移

遷移回数も増大し、結果的にネットワークの寿命が短くなることが考えられる。よって、現状の低管理コストセンサネットワークは、ネットワークの拡張性（スケーラビリティ）の問題がある。

4. 提案手法

4.1 提案手法の概要

小島らが提案した低管理コストセンサネットワークでは、故障等によりトポロジが変化した場合に、配送木を辿ってネットワーク全体にその変化を周知し、全ノードが配送木構築状態となる。これに対して提案手法では、必要最低限の局所領域内のノードのみが配送木構築状態となり、配送木を再構築する。これを実現するにあたっては、葉ノードがビーコンを送信しないため、他のノードから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7に例を示す。図7(a)は配送木が構築され、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。提案手法で目指すのは次ホップが変わるノード数を最小化して局所的に修復することであり、この例ではノードEとKが次ホップを変更してHに接続することで、2ノードのみの変化で配送木が再構築できる(図7(b)) (処理の便宜上、提案手法ではLの次ホップも変更される)。このためにはHはKの次ホップに選択されたことを知って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、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箇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7(a)で

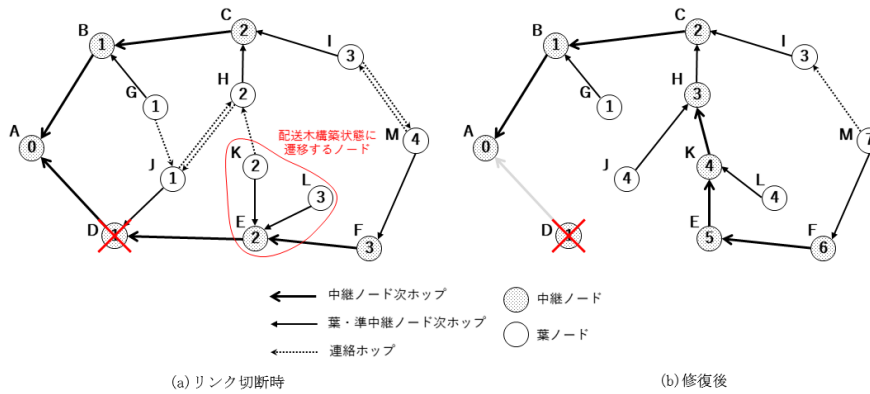


図 7 配送木再構築の概要

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も、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 節で連絡ホップの選択法を、4.3 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 提案手法：連絡ホップの選択

まず、連絡ホップの選択方法を述べる。先述の通り、提案手法では、全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 $par(n_x)$ 、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に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良い。図 7(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。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。以上の提案手法のノード状態ごとの動作を、表 2 にまとめる。

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。従って、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する。このために、3 節で述べた次ホップの選択法と同様に、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 $D(par(par(n_x)))$ 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

表 2 提案手法のノード状態ごとの動作

ノード状態	ノード種別	動作
定常状態	中継ノード	RC-MAC に準ずる (ビーコンタイミングで送受可能)
	葉ノード	RC-MAC から定期的なビーコン送信を停止 (送信のみ可能)
	準中継ノード	葉ノードとして動作しながら, 定期的にビーコンを送信 (ビーコンタイミングで送受可能)
配送木構築状態	(全ノード)	常時スリープせず受信待機 (常に送受可能)

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, 全ての葉ノードは, 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.

4.3 提案手法: トポロジ変化時の配送木の再構築動作

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, シンクノードまでの到達性が失われるため, シンクノードからのホップ数 $\text{level}(n)$ 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 $\text{level}(n)$ 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, 次ホップがもつ $\text{level}(\text{par}(n))$ が ∞ であれば, 自身のもつ $\text{level}(n)$ 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, シンクノードからのホップ数が ∞ でない隣接するノード 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 $\text{level}(n_e)$ に 1 加算した値をノード n_x のシンクノードからのホップ数 $\text{level}(n_x)$ として設定する. 各中継ノード, 準中継ノードが, 送信するビーコンにはシンクノードからのホップ数が含まれており, この値を通じてシンクノードからのホップ数が ∞ 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, 何もしなくて良い.) その後, フレームの交換によって順次

シンクノードからのホップ数が更新され, 出口ノードから到達可能なノードは全てシンクノードからのホップ数が ∞ 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, シンクノードからのホップ数に ∞ 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, 次ホップのシンクノードからのホップ数が ∞ 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.

図 7(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 のシンクノードからのホップ数が ∞ 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 のシンクノードからのホップ数が (H 経由のシンクノードからのホップ数に) 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 のシンクノードからのホップ数は ∞ 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 のシンクノードからのホップ数は I を経由したものに更新される.

なお小島らによる低管理コストセンサネットワークでは, 次ホップのシンクノードからのホップ数が変更された場合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ノードからのホップ数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ノードからのホップ数を更新することとする.

上記提案プロトコルにおいて, ノード n_s から制御メッ

表 3 関数および集合の定義

関数・集合	定義
$par(n)$	ノード n の次ホップノード
$level(n)$	ノード n のシンクノードからのホップ数
$flg_{topo}(n)$	ノード n が送信するフレームの、「トポロジ変化フラグ」の状態
$type(n)$	ノード n のノード種別 中継/葉/準中継ノードのいずれか
$update_{level}()$	シンクノードからのホップ数を更新する
$update_{next}()$	次ホップを更新する
$update_{contact}()$	連絡ホップを更新する
$start_{wait}()$	配送木構築状態遷移待機タイム開始

配送木構築状態ノード n_r が制御メッセージ受信時の処理

```

/* $n_s$  は制御メッセージ送信ノード,
 $n_r$  は制御メッセージ受信ノード*/

/*シンクノードからのホップ数が決定済のノードから受信*/
if  $level(n_s) \neq \infty$  then
/*シンクノードからのホップ数, 次ホップ, 連絡ホップを更新*/
   $update_{level}()$ 
   $update_{next}()$ 
   $update_{contact}()$ 
  exit

/*シンクノードからのホップ数が未決定のノードから受信*/
else if  $level(n_s) = \infty$  then
  if  $flg_{topo}(n_r) = false$  and  $flg_{topo}(n_s) = true$  and
     $n_s = par(n_r)$  then
     $level(n_r) = \infty$ 
    if  $type(n_r) =$  中継ノード then
       $start_{wait}()$ 
    else
       $flg_{topo}(n_r) = true$ 
    end if
  end if
end if
end if

```

図 8 制御メッセージ受信時の処理

セージを受信したノード n_r の動作を図 8 にまとめる。また、図内で用いた関数および集合の定義を表 3 に示す。

5. 評価

5.1 評価目的

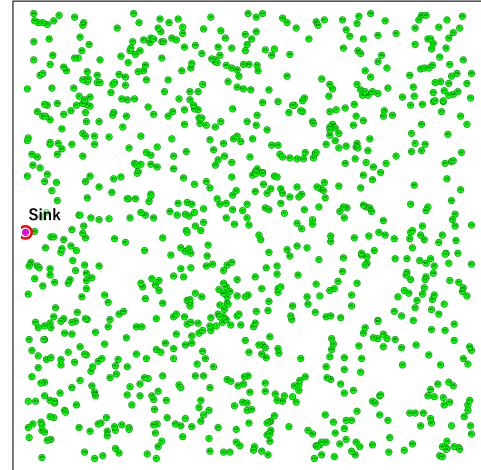
本研究における提案手法では、低管理コストセンサネットワークにおいてノード故障等のトポロジ変化が発生した際に、局所的に配送木を再構築することを目指している。配送木の再構築に要する範囲を抑えることができていることを確認するため、配送木再構築時に配送木構築状態に遷移するノード数を評価指標として、評価実験を実施する。

5.2 評価方法

C++によるシミュレーションプログラムに提案手法の

表 4 実験パラメータ

パラメータ	値
構成ノード数 n	500, 1000, 1500, 2000 [個]
ビーコン送信間隔	20 [秒]
制御メッセージ送信間隔	20 [秒]
センシング間隔	300 [秒]
中継ノード再構築待機時間	330 [秒]
通信可能距離	100 [m]
故障ノードの最低子孫数	20 [個]
実験試行回数	1000 [回]

図 9 ノード配置例 ($n = 1000$)

経路制御プロトコルを実装して、評価実験を行う。観測領域上にランダムにノードを生成し、初期配送木を構築する。初期配送木構築後、条件を満たす中継ノードをランダムに 1 つ選択して障害が発生させ、配送木再構築動作を実行する。

表 4 に評価実験で用いた各パラメータを示す。本評価実験では 1000m 四方の正方形の観測領域に、図 9 のノード配置例のように n 個のノードをランダムに配置する。シンクノードは観測領域上の座標 (0, 500) に設置することとする (図 9 左端中央のノード)。実験試行回数はノード数 n ごとに 1000 回とし、試行ごとにノード配置はランダムに生成する。

評価指標としては、配送木再構築動作中に配送木構築状態に遷移したノード数を用いる。なお、低管理コストセンサネットワークでは、障害が発生したノードを除く全ノードが、配送木構築状態に遷移した後に次ホップの再選択を行うため、配送木構築状態に遷移したノード数は $n - 1$ とする。また、通信の衝突等によるフレーム損失は、今回は考えないものとする。

5.3 評価結果

それぞれの n に対して、配送木再構築動作中に配送木構築状態に遷移したノード数の平均を求めた結果を表 5 に示す。

表 5 提案手法による配送木再構築に要する平均ノード数

	ノード数			
	500	1000	1500	2000
配送木構築状態 遷移ノード数	15.389	28.277	39.922	48.275

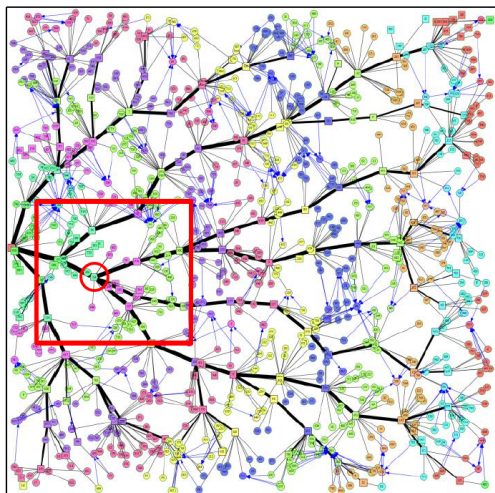


図 10 初期配送木構築後のネットワーク経路図

提案手法により、配送木再構築動作中に配送木構築状態に遷移したノード数は、それぞれの n に対して、既存手法による再構築に要するノード数と比較して大幅に少ないノード数で配送木の再構築を完了することが確認された。

また、 $n = 1000$ において、提案手法の経路制御プロトコルにより初期配送木を構築した後のネットワーク経路図を図 10 に、配送木中の中継ノード 1 つに障害を発生させ、提案手法による配送木再構築が完了した後のネットワーク経路図を図 11 に示す。障害が発生したノードは図 11 中の \times 印で示したノードである。図 10 と図 11 の配送木において、黒色の枝は次ホップを、青色の矢印は準中継ノードへの連絡ホップを示す。ノードの塗りつぶし色が同じノードは、各ノードが保持しているシンクノードからのホップ数が同じノードである。図内赤枠の内部が配送木の再構築が行われた範囲であり、図 10 と図 11 では黒色で表される次ホップが変更されていることが確認できる。

6. おわりに

本研究では、低管理コストセンサネットワークにおける障害発生時の部分的な配送木再構築手法を提案した。また、C++により作成したシミュレーションプログラムを用いて、提案手法の評価実験を行った。

シミュレーションプログラムによる評価実験の結果、提案手法では、障害発生時に全ノードが次ホップの再選択を実行して配送木を再構築する既存手法と比較して、大幅に少ないノード数で配送木の再構築が完了することが確認された。

今後の課題として、トポロジ変化の発生した地点より配

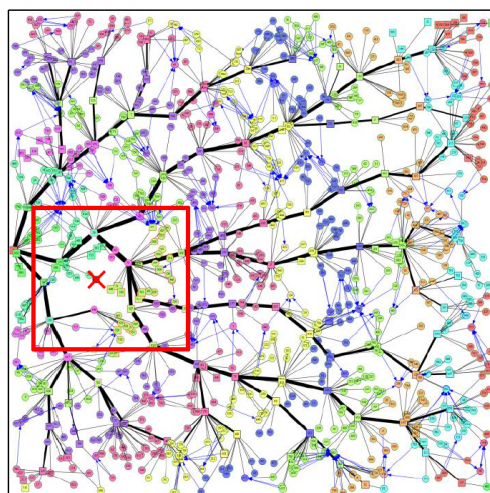


図 11 配送木再構築後のネットワーク経路図

送木の末端側に初期配送木構築時点で連絡ホップが存在しない場合は、配送木の再構築を行うことができない点がある。また、故障したノードが葉ノードや準中継ノードの場合は配送木の再構築動作が行われなため、故障したノードを用いた連絡ホップが存在した場合は、その連絡ホップが失われてしまう点も課題である。また、配送木再構築を行う中継ノードの子ノードである葉ノードは全て配送木構築状態に遷移することとなり、最小範囲で再構築が行われているとは言えない、このことから、提案手法には更なる改善の余地があると考えられる。

将来的には研究用センサノード等を用いた実機実験が必要であると考えるが、まずは他のセンサネットワークに関する研究においてよく用いられるネットワークシミュレーションへの実装と動作の確認が必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] J. M. Kahn, R. Katz and K. Pister: “Next century challenges: mobile networking for “Smart Dust,”” In Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.271-278 (1999).
- [5] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan: “Energy-Efficient Communication Protocol for

- Wireless Microsensor Networks,” In Proc. 33rd Hawaii International Conference (2000).
- [6] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han: “X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks,” In Proc. of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys ‘06) (2006).
- [7] 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 the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys ‘08), pp.1-14 (2008).
- [8] MEMSIC Inc: “TelosB Data Sheet”,
入手先 (<http://www.memsic.com/userfiles/files/DataSheets/WSN/telosb.datasheet.pdf>) (参照 2016-01-26).
- [9] P. Huang, C. Wang, L. Xiao: “RC-MAC: A Receiver-Centric MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks,” In Proc. of the 18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS ‘10) (2010).