

## 管理コストが低い長寿命な無線センサネットワークにおける トポロジ変化時の部分的な配送木の再構築手法

横谷晟人<sup>1,a)</sup> 吉廣卓哉<sup>1,b)</sup>

無線センサネットワークを長期にわたり安定的に運用するには、省電力化によるネットワークの長寿命化が必要である。既存研究として、低消費電力な受信ノード主導型 MAC プロトコルを改良して、配送木の葉ノードの消費電力をさらに低減した MAC プロトコルが提案されている。これを、定期的なバッテリー交換が必要なノード（葉ノード以外のノード）の数を低減する配送木構築アルゴリズムと組み合わせることにより、ネットワークの長寿命化と管理コストの低減を実現するセンサネットワーク構成法が提案されている。しかし、この手法では、トポロジの変化が生じた際に配送木全体が「配送木構築状態」に遷移し、電力を多量に消費する問題がある。本研究では、トポロジ変化時にも一部のノードのみを「配送木構築状態」に遷移させることでより低い消費電力で配送木を再構築する改良について検討を行う。

### 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、各センサの取得したデータを、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、これまで設置することの困難であった場所でも柔軟にセンサを設置することが出来ることから製造業や災害対策等において応用が進んでいる。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よるネットワーク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。また、センサ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収集の高い信頼性が要求される。これらの特徴から、無線センサネットワークを長期に渡り安定的に運用するには、省電力化によるネットワークの長寿命化の実現と各センサノードからシンクノードへのセンシングデータ到達の信頼性の向上が必要である。

無線センサネットワークの長寿命化に関する既存研究として、小島らの手法<sup>1,2)</sup>がある。小島らの手法による無線センサネットワークでは、MAC プロトコルの改良による省電力化と、その上位層で動作する定期的なバッテリー交換を行う必要があるノードを削減する経路制御プロトコルの組み合わせにより、管理コストの削減を提案している。

まず、MAC プロトコルの改良においては、データの送受信時以外はスリープして消費電力を削減する手法のうち、消費電力の面で優れる受信ノード主導型 MAC プロトコルである RC-MAC<sup>3)</sup>の拡張を行っている。RC-MAC ではノードが定期的にスリープすることからブロードキャスト通信がサポートされていないため、経路制御に必要な制御メッセージの送受信を行うことができない。そこで MAC プロトコルに「定常状態」と「配送木構築状態」の2つの状態

を導入している。「定常状態」にあるノードのうち、データの中継を行う「中継ノード」は RC-MAC に準じた動作を行う。末端に位置する「葉ノード」はデータの送信のみを行うため、受信を行う必要がないことから、RC-MAC において全ノードがデータ受信のため定期的に送信しているビーコンの送信を停止して、中継ノードのビーコン送信のタイミングに合わせてのみスリープから復帰するように動作を変更することで、葉ノードの大幅な長寿命化を実現する。

「配送木構築状態」にあるノードはスリープすることなく常に送受信が可能な状態とすることで、ブロードキャスト通信をサポートし、制御メッセージの送受信を可能にする。

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。各ノードは制御メッセージを受け取ることで周囲のノードの情報を取得してシンクノードからの距離（ホップ数）を求め、子孫数が多い中継ノードを親ノードとして各ノードが選択していくことで、通信を一部のノードに集中させ、中継ノードとして選択されるノードの数を削減する。一定時間が経過した後、各ノードは定常状態へと遷移することで、配送木の構築が完了する。MAC プロトコルの拡張による大幅な長寿命化の効果によって、定常状態において葉ノードはバッテリーの交換が必要ないのに対して、中継ノードは定期的なバッテリーの交換が必要である。中継ノード数を削減することで管理コストを抑えて長期に渡りネットワークを運用することが可能となる。

しかし、小島らの手法には問題点がある。小島らの手法では、トポロジの変化を検出すると配送木を辿って配送木全体が配送木構築状態に遷移することで一から配送木の再構築が行われる。しかしながら、配送木構築状態にあるノードは常に制御メッセージを送受信可能な状態にあるため、定常状態にあるノードに比べ消費電力量が大きくなり、配送木全体の的中継ノードの電池残量が平均的に減少していると配送木構築状態への遷移が各所で頻発して、配送木の寿命が急速に短くなってしまいう問題が考えられる。

そこで、トポロジの変化を検出し配送木構築状態に遷移したノードが近隣の定常状態にあるノードにメッセージを

1 和歌山大学システム工学部  
Wakayama University, Sakaedani 930, Wakayama-city 640-8510, Japan.  
a) s171059@sys.wakayama-u.ac.jp  
b) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

直接送信することにより配送木構築状態へ遷移させ、一部のノードのみで配送木の再構築を行う手法が考えられる。しかし、定常状態において葉ノードはビーコンの送信を停止しているためスリープ状態であるのかを検出することは不可能であり、さらにデータの送信終了後直ちにスリープ状態に遷移することから、親子の関係に無い葉ノードに対して直接通信を行うことは不可能であるという問題がある。

この問題に対して、本研究では、小島らの手法による無線センサネットワークに「共通葉ノード」と「準中継ノード」の2種類のノードを追加することにより、親子関係に無い別のタイミングで動作している中継ノードとの間に経路を作成する。この中継ノード間の経路を用いてノード故障等のトポロジ変化が発生した際に、シンクノードへのセンシングデータの送信が断られたノードが配送木に再接続するために必要な領域のノードのみを配送木構築状態へ遷移して配送木への再接続を行う手法を提案する。

## 2. 提案手法

### 2.1 提案手法の概要

提案手法は、小島らの手法を拡張し、配送木の親子関係に無い別のタイミングで動作している中継ノードとの間に「共通葉ノード」と「準中継ノード」の2種類のノードを用いて中継ノード間の経路を追加する。なお、図1の例において中継ノード列 B, C...とそれぞれの子ノード、中継ノード列 D, E...とそれぞれの子ノードの集合を以降「幹」とし、例として B と D, C と E といった親子関係に無い別のタイミングで動作している中継ノードを「別の幹に属している」と呼ぶこととする。「共通葉ノード」と「準中継ノード」を追加することで、トポロジの変化が発生した際に配送木の親子に沿った方向（縦方向）のみでなく配送木の別の幹へ接続する方向（横方向）のノードを迅速に配送木構築状態とすることができる。トポロジ変化が発生した箇所からシンクノードへの通信が確保されているノードまでの範囲のみを配送木構築状態とすることで、配送木全体を配送木構築状態とすることなく、最小限のノードのみを配送木構築状態にして配送木の再構築を実現する。

### 2.2 想定する無線センサネットワーク

本研究で想定する無線ネットワークは文献1, 2)と同じであり、無線通信機能とセンサを搭載した多数のセンサノードにより構成された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データを生成し、ネットワーク上のシンクノードへ無線マルチホップ通信を用いて送信する。また、シンクノードまで各ノードが複数の経路でデータを送信することができる程度に密にノードが配置されていると仮定する。

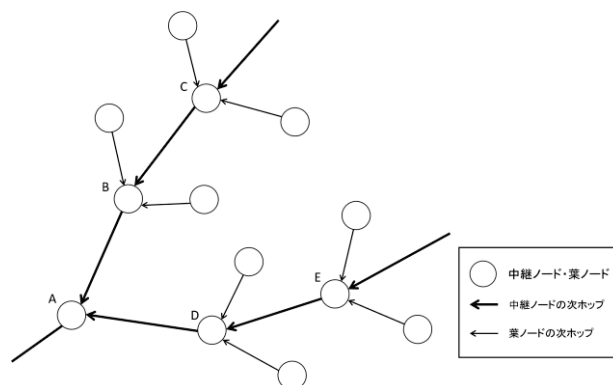


図1 既存手法における配送木

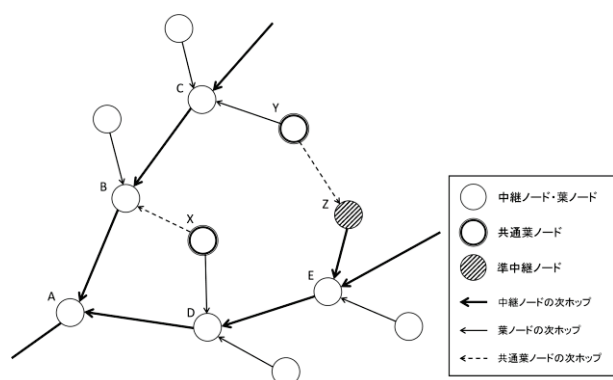


図2 共通葉ノードおよび準中継ノード

### 2.3 「共通葉ノード」および「準中継ノード」の導入

定常状態において、異なる幹の中継ノードはそれぞれ干渉を防ぐため異なるタイミングで通信を行っている。また、中継ノードを可能な限り削減した経路が経路制御プロトコルにより生成されるため、中継ノード間の距離が遠くなり直接通信を行うことは困難となる。さらに、葉ノードはビーコンの送信を停止しているためスリープ状態であるのかを検出することは不可能であり、データ送信を終了後直ちにスリープ状態に遷移することから異なる幹に属する葉ノードに対して直接通信を行うことは不可能である。そこで、幹の異なる中継ノード2つを宛先に持つ葉ノードである「共通葉ノード」および中継ノードを親に、共通葉ノードを子に持つ「準中継ノード」を新たに導入する。

「共通葉ノード」は定常状態にあるときは一方の中継ノードのみに定期的にセンシングデータを送信し、他方の中継ノードには定期的にACKのみを送信する葉ノードである。トポロジに変化が発生したことを検知し、共通葉ノードが接続しているどちらか一方の中継ノードが配送木構築状態に遷移すると、ビーコンもしくはデータフレームに含まれるフラグによって共通葉ノードも配送木構築状態に遷移し、他方の中継ノードに対して配送木構築状態であるという意のフラグが立ったデータもしくはACKを送信する。これを中継ノードが受信することで幹を跨いで配送木構築状態に遷移させることができる。図2を用いて説明する。共通葉ノードXは中継ノードB, Dの2中継ノードに接続

し、センシングデータを  $D$  に、ACK を  $B$  に定期的送信する。中継ノード  $D$  が配送木構築状態となると、ノード  $X, B$  と順に配送木構築状態へと遷移される。

「準中継ノード」は2中継ノード間が共通葉ノードのみを用いて2ホップで到達できず、3ホップで到達できる場合に一方の中継ノードと他方の中継ノードに接続した共通葉ノードの間を接続するノードである。

準中継ノードは葉ノードに準じて通常の中継ノードに接続しながら、共通葉ノードのみを子に持つ中継ノードとして動作を行う。共通葉ノードと準中継ノードを用いることで「中継ノード-共通葉ノード-準中継ノード-中継ノード」といった接続を形成し、中継ノード間を3ホップで接続する。図2を用いて説明する。中継ノード  $C, E$  間は中継ノード  $B, D$  間のように共通葉ノード1つを経由して中継ノード間を接続することはできない。そこで、中継ノード  $E$  の子である  $Z$  を「準中継ノード」とし、ノード  $C$  の子である  $Y$  を「共通葉ノード」として  $C$  及び  $Z$  に接続することで、中継ノード  $C, E$  間の接続を形成することができる。 $Y$  は定期的にセンシングデータを  $C$  に、ACK を  $Z$  に送信する。 $Z$  は中継ノードとして動作するため、定期的にセンシングデータを  $E$  に送信する。

選択される2中継ノードはシンクノードからの距離がそれぞれ同じ中継ノードを想定し、2中継ノード間の接続数は常に1本となるように管理を行う。また、一つの中継ノードがシンクノードからの距離が同じ複数の中継ノードに接続することも可能とする。「共通葉ノード」および「準中継ノード」の選択と接続の形成はノードが「配送木構築状態」にある場合に行われ、配送木が収束すると、シンクノードを中心とした同心円状の経路が形成される。

## 2.4 配送木変更処理の流れ

以下にトポロジの変化の検出から配送木の再構築の後定常状態に遷移するまでの手順の概要を示す。

### (i) トポロジ変化の検出

中継ノードは定期的にビーコンを送信し葉ノードは定期的にデータを送信することから接続しているノードはビーコンの有無やデータ送信の有無を検知することでトポロジの変化を検出することが出来る。

### (ii) 配送木構築状態への遷移

トポロジ変化を検出したノードは配送木構築状態に遷移し、接続している各ノードに伝達される。また、別の幹に属する中継ノードも共通葉ノードおよび準中継ノードを通じて順次配送木構築状態へと遷移する。

### (iii) シンクノードまでの通信経路が確保されているノードの検出

トポロジ変化を検出したノードを起点として配送木構築状態へ各ノードが順次遷移する過程で、シンクノードまでの通信経路が確保されているノードが見つかったら、配送木構築状態に遷移したすべてのノードに対して制御メッセージを用いて配送木構築状態への遷移の伝達を中止させる。これによりシンクノードへのセンシングデータの送信が断られたノードが配送木に再接続するために必要な領域のノードのみを配送木構築状態に遷移させることが出来る。

### (iv) シンクノードまでのホップ数の再計算

シンクノードまでの通信経路が確保されているノード  $n_c$  を始点として、配送木構築状態にあるノードはシンクノードまでの距離(ホップ数)を再計算する。各ノードが一定時間毎に送信する制御メッセージにはそのノード  $n_s$  が把握しているノード  $n_s$  からシンクノードまでの距離  $\text{dist}(n_s)$  が含まれている。制御メッセージを受け取ったノード  $n_r$  は自身の保持するノード  $n_r$  からシンクノードまでの距離  $\text{dist}(n_r)$  と受け取ったノード  $n_s$  からシンクノードまでの距離  $\text{dist}(n_s)$  を比較し、 $\text{dist}(n_r)$  が未設定もしくは  $\text{dist}(n_s) + 1 < \text{dist}(n_r)$  ならば  $\text{dist}(n_r) = \text{dist}(n_s) + 1$  に更新する。これを配送木構築状態にあるノードが繰り返すことで、ノード  $n_c$  から順次配送木構築状態にあるノードのシンクノードまでの距離が決定される。

### (v) 配送木の再構築

配送木構築状態にあるノードのシンクノードまでのホップ数が確定すると、小島らの手法の経路制御プロトコルに従って配送木の構築が自律的に行われる。同時に共通葉ノードおよび準中継ノードが選択され、中継ノード間の経路が形成される。配送木の収束後一定の時間が経過し各ノードが定常状態に遷移することで、配送木の再構築が完了する。

## 3. おわりに

本研究では、小島らの手法による無線センサネットワークを拡張し、配送木の幹の間に中継ノード間の経路を追加することで、ノード故障等に起因するトポロジ変化の発生時に配送木全体を配送木構築状態に遷移させることなく最小限のノードのみを配送木構築状態として配送木の再構築を行う手法を提案した。

今後の課題として、経路の追加に伴う消費電力量の変化によるネットワークの寿命の評価や、ノード故障時の提案手法の動作について評価を進める必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) 小島祥平, 吉廣卓哉, : 受信ノード主導型 MAC プロトコルを利用した管理コストが低い長寿命な無線センサネットワーク, 第22回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, pp.27-37 (2014).
- 2) 小島祥平, 吉廣卓哉, : 低管理コストな無線センサネットワークに向けた中継ノードの少ないデータ配送木の構築手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2015)シンポジウム論文集, pp.340-346 (2015).
- 3) 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)