

無線センサネットワークにおける センサ端末の故障とスリープ制御を考慮した 局所的なトポロジメンテナンスについて

小路 直紀^{1,a)} 松尾 和哉^{1,b)} 神崎 映光^{2,c)} 原 隆浩^{1,d)} 西尾 章治郎^{3,e)}

概要：観測領域全体を定期的に観測する環境モニタリングでは、地理的な観測粒度を保証するように観測領域を分割し、各領域（セル）ごとのデータを要求する場合が考えられる。このような環境を想定し、筆者らは、必要最小限のノードのみに通信を行わせるスリープ制御を適用することで、各セルのデータを長期間収集できるデータ収集トポロジ構築手法を提案した。一方、無線センサネットワークでは、一部のセンサ端末が故障などで使用不可能な状態に陥ることが考えられる。従来手法ではセンサ端末の故障を想定しておらず、データの欠落が発生する可能性がある。そこで本稿では、従来手法をセンサ端末の故障に対応させるため、局所的なトポロジのメンテナンスを行う手法を提案する。提案手法では、新たにメンテナンス用のトポロジを構築する。センサ端末に故障が発生した場合、このトポロジを用いて、使用不可能なセンサ端末付近のデータ収集トポロジを局所的に修正することにより、メンテナンスに要する通信を最小限に抑えながら、収集データの欠落を抑制する。さらに本稿では、提案手法の有効性をシミュレーション実験によって検証する。

キーワード：無線センサネットワーク、トポロジメンテナンス、スリープ制御、観測粒度

1. はじめに

無線センサネットワークの代表的なアプリケーションとして、観測領域全体を定期的に観測する環境モニタリングがある。環境モニタリングでは、観測領域内にセンサ端末を大量に配置し、各センサ端末が取得した情報（以降、データを）、ネットワークに接続している基地局に収集することが一般的である。このようなアプリケーションの中には、配置された全てのセンサ端末が取得したデータは必要なく、観測領域を複数のセルに分割し、分割された各セルごとのデータといった、ある一定の観測粒度に従ったデータを定期的に要求するものもある [4]。この場合、アプリケーション要求の観点からは、観測粒度を保証するために各セルから最低一つのデータを長期間定期的に収集することが望まれる。

また、センサネットワークでは、各センサ端末から基地局までのデータ収集を行うため、複数のセンサ端末を介する通信経路を構築する必要がある。ここで、一般的に用いられる電池駆動のセンサ端末は、データの送受信及び通信待機状態において特に多くの電力を消費することが知られている [6]。そのため、アプリケーション要求を長期間満足するためには、データの送受信や待機状態における電力の消費を最小限に抑えることが望まれる。そのための方法として、各セルからデータを収集するために必要な最小限のセンサ端末のみを稼働させ、その他のセンサ端末は休止状態となるように制御するスリープ制御が有効である。

以上の観点から、筆者らは、観測粒度と各センサ端末の残余電力を考慮し、必要最小限のセンサ端末のみを稼働させるスリープ制御により、各セルのデータを長期間収集できるデータ収集トポロジ構築手法を提案した [8]。この手法（以降、従来手法）では、セル内の全てのセンサ端末が早期に電池切れになり、アプリケーション要求を満たせなくなることを防ぐために、各セル内に存在するセンサ端末の残余電力の合計値であるセル電力を定義し、これに基づき、各セルから一つずつデータを収集するトポロジを構築する。具体的には、各セルから基地局までの通信経路を、

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² 島根大学大学院総合理工学研究所

³ 大阪大学

a) shoji.naoki@ist.osaka-u.ac.jp

b) matsuo.kazuya@ist.osaka-u.ac.jp

c) kanzaki@cis.shimane-u.ac.jp

d) hara@ist.osaka-u.ac.jp

e) nishio@ist.osaka-u.ac.jp

セル電力の低いセル内のセンサ端末を避けるように構築する。このトポロジの構築に必要なセンサ端末のみ稼働させ、その他の端末を休止状態に遷移させることで、セル電力の低いセル内における電力消費を小さく抑え、結果として各セルのデータを長期間収集できる。

ここで、従来手法では、ネットワーク内の全センサ端末が、電池切れとなるまでは常時正常に機能することを前提としている。一方、小型のセンサ端末を大量に設置するような環境では、センサ端末に故障などの不具合が発生し、一部のセンサ端末が使用不可能な状態に陥ることが考えられる [7]。そのため従来手法では、センサ端末の故障が発生した場合にアプリケーションが要求するデータを収集できなくなる。このような状況においてもデータ収集を継続するためには、故障端末の出現を検知し、データ収集のためのトポロジを迅速に再構築する必要がある。しかし、スリープ制御によって休止状態に遷移しているセンサ端末が存在する状況においてこれらの処理を行うためには、センサ端末を頻繁に稼働させ、トポロジ再構築のための通信を行わせる必要があり、各端末の消費電力が著しく増大してしまう。

ここで、一部のセンサ端末が故障した場合においては、トポロジ全体を再構築するようなメンテナンスは必要なく、局所的なメンテナンスのみで対応可能な場合が多いものと考えられる。そこで本稿では、スリープ制御による消費電力の抑制を維持しつつ、センサ端末の故障に対応し、データ収集のためのトポロジを局所的にメンテナンスする手法を提案する。提案手法では、従来手法によって構築されたトポロジ上のセンサ端末に故障が発生した場合に、故障端末が含まれる通信経路のみを迅速に修正することにより、データ収集の失敗を可能な限り少なくする。そのため、データ収集用のトポロジとは別に、全センサ端末を含むメンテナンス用のトポロジを構築し、このトポロジに対し、定期的に基地局と各センサ端末が双方向で通信可能となるようにスリープ制御を適用する。センサ端末に故障が発生した場合、メンテナンス用トポロジ上のセンサ端末のうち、修正が必要な通信経路の周辺に存在するもの間でのみ通信を行うことで、局所的なトポロジのメンテナンスを実現する。

以降では、まず 2 章で本稿の想定環境について述べる。3 章で従来手法について述べ、センサ端末に故障が発生した場合の問題点について述べる。4 章では提案手法について述べ、5 章でシミュレーション実験の結果を述べる。最後に 6 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 想定環境

観測領域内に、一つの基地局と、一意な識別子が割り当てられた複数のセンサ端末が観測粒度に対して密に配置されているものとする。各センサ端末は、データの送受信

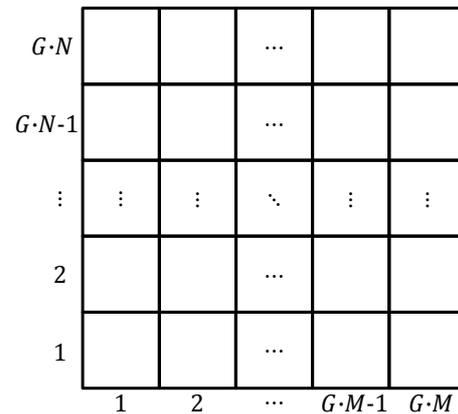


図 1 観測領域とセル (観測粒度: $G^2 \cdot M \cdot N$).

時および通信待機状態時に電力を消費するものとする。なお、議論の簡単化のため、これら以外の処理における消費電力は無視できるものとする。任意の二端末間の通信は、そのセンサ端末間の距離が通信半径 r 以下である場合のみ可能とし、このような位置関係にあるセンサ端末を隣接端末と呼ぶ。また、各センサ端末には、一定の確率で故障が発生するものとする。故障が発生したセンサ端末は一切の機能を失い、その後のデータ収集には参加できないものとする。各センサ端末は、GPS や文献 [2] のような既存プロトコルにより、自身の位置を把握しているものとする。基地局は、これらの情報をシステム運用前に収集し、全センサ端末の識別子と位置を予め把握しているものとする。

対象とする観測領域は縦横が $M : N$ の整数比となる二次元平面を想定する。アプリケーションは、 $G^2 \cdot M \cdot N$ ($G = 1, 2, \dots$) の整数値で観測粒度を指定する。基地局は図 1 に示すように、観測領域を $G \cdot M \times G \cdot N$ の格子状のセルに分割し、定期的に各セルのデータを要求する。また、各データ収集時において有効なデータは、そのデータ収集を開始した時点から、次のデータ収集を開始するまでの期間内に観測・収集されたデータであるものとする。

3. 従来手法

本章では、筆者らが文献 [8] において提案した従来手法について説明し、本稿で想定するセンサ端末の故障が発生した際に生じる問題点について述べる。

従来手法では、3.2 節で述べる方法に従って、データ収集用のトポロジを構築し、このトポロジに従って、3.3 節で述べる手順により、基地局へのデータ収集を行う。ここで、このトポロジを構築するためには、基地局が各センサ端末の残余電力に関する情報を収集し、これを基に作成したトポロジ情報を全センサ端末に通知する必要がある。そのため、従来手法では、データ収集用のトポロジとは別に、3.1 節で述べる方法に従って情報交換用のトポロジを構築する。以降では、前者をデータ収集トポロジ、後者を情報交換トポロジとして説明を行う。

3.1 情報交換トポロジの構築

基地局は、以下の手順に従って、必要最小限の通信回数で全センサ端末との相互通信が可能な情報交換トポロジを構築する。

まず、基地局から各センサ端末までの最小ホップ数を計算する。このとき、基地局自身のホップ数は0とする。次に、図2に示すように、ホップ数が異なる隣接端末間を接続し、この接続関係において基地局と全端末が双方向に通信できるよう、センサ端末を稼働・休止させるタイミングであるスリープスケジュールを作成する。基地局からセンサ端末方向の通信については、基地局を起点とし、ホップ数の小さい端末から順にメッセージが拡散できるように、送受信が可能な稼働状態に遷移させる。このスケジュールでは、各センサ端末は、自身よりホップ数が小さい隣接端末群がメッセージを送信する直前に稼働し、送信されたメッセージを受信する。その後、自身よりホップ数が大きい隣接端末群へメッセージを送信した後、休止状態に遷移する。また、上記とは逆方向の通信を行うため、ホップ数が最大のセンサ端末を起点に、ホップ数が大きい端末から順にメッセージを送信するスリープスケジュールも作成する。

以上の手順によって作成したトポロジに関する情報は、システム運用前に全センサ端末に通知され、システム運用中は常にこのトポロジが情報交換のために用いられる。

3.2 データ収集トポロジの構築

基地局は、まず各センサ端末の残余電力を要求するメッセージを作成し、情報交換トポロジに従って、全センサ端末に送信する。これを受信した各センサ端末は、情報交換トポロジに従って、自身の識別子および残余電力を基地局に向けて返信する。全センサ端末の残余電力を収集した基地局は、以下の手順に従って、データ収集トポロジを構築する。

- (1) 代表端末の決定：各セル内のセンサ端末のうち、最も残余電力が大きいセンサ端末を、データを提供する代表端末として選出する。
- (2) セル電力の算出：各セルに対し、セル内に位置する全センサ端末の残余電力の合計値であるセル電力を算出する。
- (3) 通信経路の作成：全代表端末から基地局までの通信経路を、ダイクストラ法 [3] により作成する。具体的には、稼働可能な全センサ端末を対象とし、隣接する端末間で方向付きの辺を与える。各辺のコストは、その辺の終点となるセンサ端末のセル電力の逆数に設定する。これにより、セル電力の大きいセンサ端末を経由する辺のコストが小さく設定され、通信経路上の端末として選択されやすくなる。
- (4) スリープスケジュールの作成：代表端末、および手順(3)において選出された通信経路上の端末のみを対象

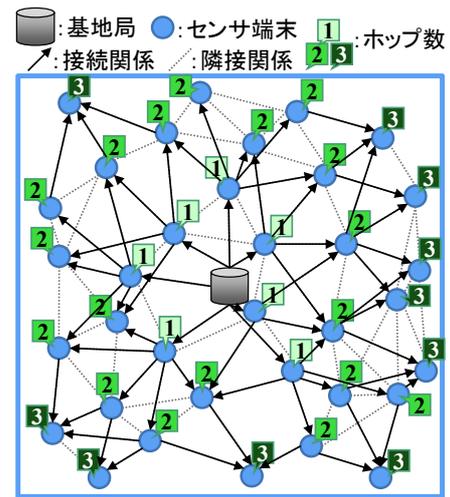


図2 情報交換トポロジの例（基地局からセンサ端末方向）

に、基地局からのホップ数に基づき、ホップ数の大きいセンサ端末から順にパケット送信が行えるよう、スリープスケジュールを設定する。また、データ収集に参加しないセンサ端末は、常に休止状態とする。

次に基地局は、構築したトポロジにおいて、いずれかのセンサ端末が電池切れになる時点を算出し、その時点を当該トポロジの有効期限とする。

最後に基地局は、構築したトポロジおよび有効期限に関する情報を、情報交換トポロジを用いて全センサ端末に通知する。各端末は、受信した情報に基づき、有効期限に達するまでの間、指定されたデータ収集トポロジに従って、3.3節で述べる動作によってデータ収集を行う。

3.3 データ収集

基地局から指定されたデータ収集トポロジに従い、基地局からのホップ数が大きいセンサ端末から順に、代表端末が取得したデータを含むデータパケットを送信する。各センサ端末は、自身よりホップ数が大きい隣接端末から受信したデータパケットに含まれるデータを一つのパケットに集約しながら、データパケットを基地局に向けて転送する。

3.4 故障発生時の課題

従来手法では、一部のセンサ端末が故障した場合でも、有効期限までは設定されたデータ収集トポロジに従ったデータ収集が継続されるため、端末の故障により通信経路が分断された箇所のデータが収集できず、データの欠落が発生する可能性がある。

従来手法においてこの問題を緩和するためには、故障端末を含まない新たな通信経路を作成するため、データ収集トポロジの有効期限を短く設定し、トポロジの再構築を頻繁に行う必要がある。この場合、全センサ端末が頻繁に稼働し、3.2節で述べた通信を行わなければならない、各センサ端末の消費電力が著しく増大してしまう。

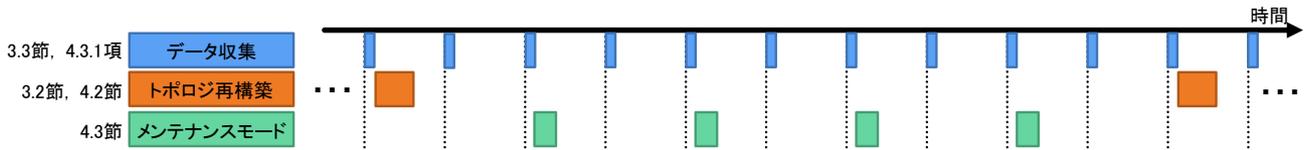


図 3 提案手法の流れ ($F_r = 10, F_m = 2$)

4. 提案手法

提案手法では、3.4節で述べた問題を解決するため、データ収集トポロジ全体ではなく、故障したセンサ端末を含む通信経路のみを局所的に修正する。ここで、いつどこで発生するか事前に予測できない故障に対応し、通信経路を修正するためには、従来手法と同様、全センサ端末を頻りに稼働させる必要がある。提案手法では、この動作による消費電力を抑えるため、従来手法におけるトポロジ全体の再構築よりも負荷の小さいメンテナンスモードを導入する。メンテナンスモードでは、基地局と全センサ端末との間において、通信経路の修正が必要か確認する最低限の通信を行った後、必要と判断された場合にのみ、通信経路の修正を行う。また、通信経路を修正する際は、修正が必要な経路の周辺に存在するセンサ端末のみを稼働させ、これら端末間でのみ通信を行うことで、各端末の消費電力増大を最小限に抑える。

4.1 動作概要

基本的な動作は従来手法と同様であるが、情報交換トポロジおよびデータ収集トポロジに加えて、4.2節で述べるメンテナンストポロジを構築する。従来手法におけるトポロジ再構築およびメンテナンスモードは、それぞれ F_r 回、 F_m 回 ($F_m < F_r$) のデータ収集ごとに定期的に行う。メンテナンスモードではデータ収集トポロジのメンテナンスを行うが、トポロジ再構築においてはデータ収集トポロジおよびメンテナンストポロジの両方に対してメンテナンスを行う。そのため、トポロジ再構築時はメンテナンスモードによるメンテナンスは不要となり、図3に示すように、データ収集トポロジ再構築時はメンテナンスモードには移行しない。

以下では、まず4.2節でメンテナンストポロジについて説明し、これを用いたメンテナンスモードの動作について、4.3節で説明する。

4.2 メンテナンストポロジ

メンテナンストポロジは、従来手法における情報交換トポロジと同様、全センサ端末を含むトポロジであり、基地局と全センサ端末が双方向で通信可能となるようにスリープ制御を適用する。このトポロジは、情報交換トポロジにおけるセンサ端末間の接続関係の一部のみを採用したものである。これにより、図4に示すように、情報交換トポロ

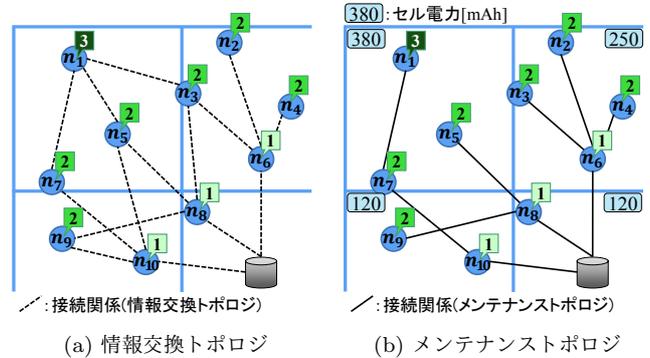


図 4 情報交換トポロジとメンテナンストポロジ

ジと比較して接続関係が疎となり、図中のセンサ端末 n_5 が n_{10} とメッセージを送受信するために稼働しなくて良くなるなど、スリープスケジュールにおける送受信のための待機時間を削減できる。また、構築の際に各センサ端末のセル電力を考慮しており、メンテナンスの実行によって特定のセルにかかる電力消費が増大することを防ぐ。

メンテナンストポロジの構築は、3.2節で述べたデータ収集トポロジの構築と同時にされる。具体的には、全センサ端末の残余電力を収集した基地局が、各センサ端末に対し、その端末よりホップ数が小さい隣接端末の中でセル電力が大きい上位 k_m 個の端末とだけ接続する関係を導出し、この接続関係において基地局と全端末が双方向に通信できるよう、スリープスケジュールを作成する。例えば、図4(a)において、センサ端末 n_3 の隣接端末のうち、ホップ数が小さいセンサ端末は n_6 と n_8 である。ここで、 $k_m = 1$ の場合、図4(b)に示すように、 n_6 のセル電力は 250[mAh]、 n_8 のセル電力は 120[mAh] であるため、セル電力が最大である n_6 のみが n_3 の接続先として選択される。以上の手順によって作成されたトポロジは、情報交換トポロジよりも接続関係が疎でありながらも、 $k_m \geq 2$ の場合においては、各センサ端末と基地局とが複数の通信経路を介して双方向に通信が可能となる。これにより、センサ端末の故障によるメンテナンストポロジの分断を抑制している。

基地局は、以上の手順によって作成したメンテナンストポロジに関する情報を、データ収集トポロジに関する情報と同時に、情報交換トポロジを用いて全センサ端末に通知する。この情報を受信した各センサ端末は、メンテナンストポロジにおいて自身を含む通信経路上のセンサ端末のうち、自身よりもホップ数が1つ小さい端末と、ホップ数が大きいすべての端末の識別子を保持する。本稿では、説明

の便宜上、後者のセンサ端末群を、当該センサ端末の子孫と表現する。例えば図4(b)のセンサ端末 n_{10} は、自身の子孫として n_1 および n_7 の情報を保持する。

4.3 メンテナンスモード

データ収集トポロジ上の端末が故障した場合、基地局までの通信経路上に故障端末が含まれる代表端末からのデータが基地局に到達できず、データに欠落が生じてしまう。メンテナンスモードでは、データが欠落しているセル（欠落セル）から基地局までの新たな経路を構築する。

前述のとおり、いつどこで発生するか事前に予測できない故障に対応し、新経路を構築するためには、全センサ端末が頻繁に稼働し、メンテナンスのための通信を行う必要がある。提案手法では、このときの消費電力を最小限に抑えるために、メンテナンスモードを以下の3つのフェーズに分割する。

確認フェーズ メンテナンスのためのメッセージを基地局から全センサ端末に送信し、これを用いて、以降のフェーズにおいて稼働すべきセンサ端末を選出する。
応答フェーズ 各端末が、新経路に参加可能か、基地局に対して応答する。
通知フェーズ 新経路を決定し、その情報を通知する。

4.3.1 故障端末の検知

提案手法における故障端末の検知は、メンテナンスモードに先立って実行されるデータ収集時に行う。

データ収集トポロジ上でセンサ端末が故障した場合、その端末はデータ収集時にデータパケットを送信できない。そのため、データ収集トポロジ上において故障端末がデータパケットの転送先に設定していたセンサ端末は、自身宛のデータパケットが送信されてこなかった場合に、そのセンサ端末が故障したことを検知できる。故障端末を検知したセンサ端末は、自身が送信するデータパケットに、故障端末の情報を付与し、基地局に向けて送信する。これにより、データパケットを収集した基地局は、故障端末の出現を検知できる。

4.3.2 確認フェーズ

データ収集時に故障端末を検知した場合、基地局は以下の情報を含む確認メッセージを生成し、メンテナンストポロジ上で直接接続している全端末に向けて送信する。

障害経路情報 現状のデータ収集トポロジに含まれる各代表端末からの通信経路のうち、故障端末が含まれるものの集合。

故障端末情報 故障端末の識別子。

新経路情報 欠落セルから基地局までの新たな通信経路。

ここで、新経路情報は、基地局が3.2節で述べた(1)から(4)の手順を欠落セルのみに対し実行することで作成する。ただし、新経路上のセンサ端末が故障している可能性を考慮して、通信経路は k_d 個 ($k_d = 1, 2, \dots$) 作成する。 $k_d \geq 2$

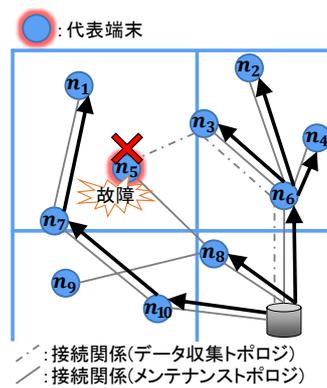


図5 確認メッセージの拡散

表1 確認メッセージに含まれる情報 ($k_d = 2$)

新経路	$(n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_6 \rightarrow \text{基地局}), (n_7 \rightarrow n_{10} \rightarrow \text{基地局})$
障害経路	$(n_5 \rightarrow n_3 \rightarrow n_6 \rightarrow \text{基地局})$
故障端末	n_5

の場合、 j 番目 ($j \geq 2$) の新経路は、それまでに作成した $j-1$ 個の新経路上のセンサ端末を除いて、上記と同様の手順を実行することで作成する。例えば、図5のデータ収集トポロジにおいてセンサ端末 n_5 が故障し、 $k_d = 2$ である場合、基地局は表1に示す情報を生成し、確認メッセージとして送信する。

基地局が送信した確認メッセージは、メンテナンストポロジに従って各センサ端末に拡散される。各センサ端末は、確認メッセージを受信した場合、以下の動作をとる。

- 障害経路情報に自身が含まれる場合、その経路を用いたデータ収集は行われなくなるものと判断し、その経路の除外によって自身がデータ収集トポロジに参加する必要がなくなった場合は、データ収集トポロジにおいて設定していたスリープスケジュールを解除する。例えば図5内の n_3 および n_6 は、 n_5 からの通信経路が除外されることで、自身がデータ収集トポロジに参加する必要がなくなるため、スリープスケジュールを解除する。
- データ収集トポロジおよびメンテナンストポロジ上で、故障端末と隣接しているセンサ端末は、今後故障端末との通信を行うことがないことを認識し、それぞれのトポロジにおいて故障端末との送受信を行うためのスリープスケジュールを解除する。
- メンテナンストポロジにおいて、新経路情報に含まれるいずれかのセンサ端末を子孫にもつセンサ端末、および新経路情報に自身が含まれるセンサ端末は、以降のフェーズにおいて継続して稼働する。

その後、各センサ端末は、受信した確認メッセージに含まれる情報それぞれに対して以下の処理を行い、メンテナンストポロジに従って送信する。

- 障害経路情報：メンテナンストポロジにおいて自身の子孫であるセンサ端末群が、障害経路の除外によって

データ収集トポロジに参加する必要がなくなる場合を除き、その障害経路情報を削除する。例えば図5の n_{10} は、 n_1 および n_7 が障害経路による影響を受けないものと判断し、障害経路情報を削除する。

- **故障端末情報**：メンテナンストポロジにおいて自身の子孫であるセンサ端末群に、データ収集トポロジまたはメンテナンストポロジ上で、故障端末と隣接しているセンサ端末が存在しない場合は、その故障端末情報を削除する。例えば図5の n_{10} は、 n_1 および n_7 が、データ収集トポロジおよびメンテナンストポロジ上で、故障端末と隣接していないため、故障端末情報を削除する。
- **新経路情報**：メンテナンストポロジにおいて自身の子孫であるセンサ端末群に、新経路に含まれるセンサ端末が存在しない場合は、その新経路情報を削除する。例えば図5の n_6 は、 $\{n_2, n_3, n_4\}$ が新経路($n_7 \rightarrow n_{10} \rightarrow$ 基地局)に含まれないため、当該経路の情報を削除する。

以上の情報の送受信を行った後、以降のフェーズで稼働し続けることを判断したセンサ端末以外のセンサ端末は、休止状態に遷移する。

なお、故障端末が検知されなかった場合は、基地局は確認メッセージの送信を行わない。各センサ端末は、メンテナンストポロジ上で確認メッセージを受信しなかった場合、メンテナンスは不要であるものと判断し、休止状態に遷移する。

4.3.3 応答フェーズ

確認メッセージ内の新経路に含まれるセンサ端末は、メンテナンストポロジに従って、自身の識別子を基地局に返信する。また、新経路において代表端末となるセンサ端末は、自身の識別子に加え、観測したデータを返信する。これにより、基地局は、新経路上の各センサ端末の生存確認を行いながら、メンテナンス直前のデータ収集において欠落していたデータを取得する。例えば図6において、新経路に含まれる5つのセンサ端末は、自身の識別子を返信する。また、新経路において代表端末となる n_1 および n_7 は、返信時に観測データも付与する。

4.3.4 通知フェーズ

基地局は、確認フェーズにおいて作成した新経路のうち、全センサ端末の生存が確認できたものを、次回以降のデータ収集トポロジに組み込み、当該経路に対しスリープスケジュールを設定する。複数の新経路が利用可能な場合は、3.2節で述べたコストが最も低い経路を選択する。例えば図6において、作成した2つの新経路に対し、全センサ端末の生存が確認できた場合、コストが最小となる経路($n_1 \rightarrow n_3 \rightarrow n_6 \rightarrow$ 基地局)をデータ収集トポロジに組み込む。

その後、基地局は、図7に示すように、決定した新経路

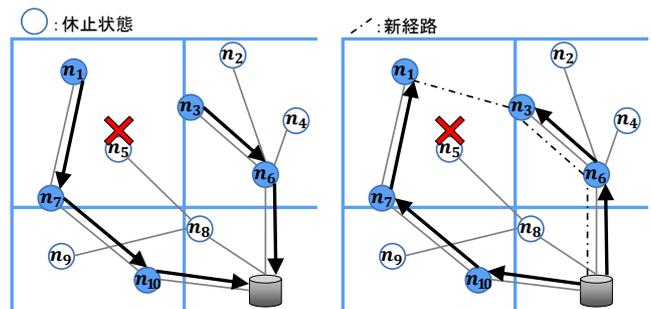


図6 応答フェーズ

図7 通知フェーズ

およびスリープスケジュールに関する情報を、メンテナンストポロジに従ってネットワーク内に拡散する。この情報は、先のフェーズにおいて休止状態に遷移しなかった全センサ端末が受信する。これらのセンサ端末のうち、決定した新経路に自身が含まれているものは、新たなスリープスケジュールを自身に設定し、次回以降のデータ収集に参加する。

一方、新経路候補すべてにおいて、経路上のセンサ端末が故障している場合、スリープスケジュールは送信せず、この時点でのメンテナンスは終了し、次回のメンテナンス時に新しく把握した故障端末情報を用いて、再度メンテナンスを行う。

以上のように提案手法では、センサ端末に故障が発生し、アプリケーションが要求するデータを収集できなくなった場合に、メンテナンストポロジを用いて、故障端末が含まれる経路のみを修正することにより、収集データの欠落を低消費電力で可能な限り少なくする。また、応答フェーズにおいて、欠落セルのデータを取得できるため、直前のデータ収集におけるアプリケーション要求も満足できる。

5. 性能評価

本章では、提案手法の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す。本実験では、ネットワークシミュレータ Scenargie 2.0*1 を用いた。

5.1 評価環境

実験では、 $100[m] \times 100[m]$ の二次元平面に1,000台のセンサ端末をランダムに配置し、基地局は二次元平面の中央に一つ配置した。アプリケーションが要求する観測粒度は 10×10 とした。すなわち、各セルの大きさは $10[m] \times 10[m]$ となる。

センサ端末間の通信は ZigBee*2 を想定し、伝送速度 $250[kbps]$ 、ヘッダサイズ $27[bytes]$ 、ヘッダを含む最大パケットサイズは $127[bytes]$ 、通信半径 $20[m]$ とした。また、各センサ端末が観測するデータのサイズは $10[bytes]$ とし

*1 Scenargie2.0 Base Simulator Revision 18021, Space-Time Engineer, <https://www.spacetime-eng.com/>

*2 ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/>

表 2 送受信・待機電流

送信電流	17.4[mA]
受信電流	19.7[mA]
待機電流	18.8[mA]

表 3 通信特性

送信電力 $E_{Tx-elec}$	208.0[nJ/bit]
受信電力 $E_{Rx-elec}$	236.4[nJ/bit]
増幅定数 ϵ_{amp}	100[pJ/bit/m ²]

た. センサ端末の電源としてコイン型リチウム電池 CR2032 型を想定し, 文献 [1] を基に, 初期電力を 51[J] とした. パケット送受信時および待機状態において生じる電流は, 文献 [6] を基に, 表 2 で表されるものとした. また, 通信時の消費電力は, 文献 [5] を基に, 次の式で表されるものとした.

$$E_{Tx}(D, r) = E_{Tx-elec} * D + \epsilon_{amp} * D * r^2. \quad (1)$$

$$E_{Rx}(D, r) = E_{Rx-elec} * D. \quad (2)$$

$E_{Tx}(D, r)$ [J] は, D [bit] のデータを通信半径 r [m] で送信する際の消費電力であり, $E_{Rx}(D, r)$ [J] は D [bit] のデータを受信する際の消費電力である. また, 送信電力 $E_{Tx-elec}$ [J/bit], 受信電力 $E_{Rx-elec}$ [J/bit], 増幅定数 ϵ_{amp} [pJ/bit/m²] の値は, 表 2 の値を基に, それぞれ表 3 で表されるものとした. なお, 各トポロジにおける受信待機時は, 27[bytes] のパケットを受信するために必要な最小限の時間だけ稼働状態になるものとした,

また, ある時点のデータ収集, トポロジの構築, またはメンテナンスが終了した時点から, 次回のデータ収集が開始する時点までに, 各センサ端末が故障する確率を故障率とし, 故障率を [1, 10][ppm](= [0.0001, 0.001][%]) の範囲で変化させて実験を行った.

5.2 評価指標

センサ端末が故障する環境では, その故障率によって, アプリケーションが要求するデータの収集に失敗する回数が増えるものと考えられる. そこで, アプリケーションが要求するデータを基地局が全て収集できた回数をデータ収集成功回数とし, データ収集を試行した回数に対するデータ収集成功回数の割合をデータ収集成功率として計測した.

また, センサ端末の故障率によって, データ収集トポロジのメンテナンスが必要となる回数が増え, これに伴う消費電力も増えるものと考えられる. そこで, トポロジのメンテナンスや再構築に要したコストを調べるため, 各センサ端末がデータ収集以外の処理で消費した総電力を, データ収集成功回数で割った値を, メンテナンスコストとして計測した.

5.3 評価手法

比較対象として, 3.4 節で述べた, 従来手法のデータ収集トポロジの再構築を短い周期で行う手法を用いた. 比較手法におけるデータ収集トポロジの再構築の周期は 400 とした. これは準備実験として, 故障率が 1[ppm] の時に, 再

構築の周期を変化させてシミュレーション実験を行い, 最もデータ収集成功回数が大きい値となった周期である.

提案手法では, メンテナンスモードの周期 F_m を, 比較手法におけるデータ収集トポロジの再構築の周期と同じ周期である 400 に設定し, トポロジの再構築の周期 F_r は, F_m の 2 倍または 10 倍に設定した. また, 提案手法のメンテナンスモードにおいて用いるパラメータである k_m および k_d は, ともに 2 に設定した.

5.4 評価結果

結果を図 8, 図 9, 図 10 に示す. 各グラフの横軸は, センサ端末の故障率を示す. グラフの縦軸は, 図 8 から順に, メンテナンスコスト, データ収集成功率, データ収集成功回数をそれぞれ表す.

図 8 より, $F_r = 4,000$ の場合, 提案手法は, 比較手法と比較して, 故障率に関わらず, メンテナンスコストを削減できることがわかる. これは, トポロジの再構築の周期 F_r を長くすることでトポロジ再構築に必要な総消費電力を削減しながら, データの欠落が生じた場合にのみ, データ収集トポロジを局所的にメンテナンスできるためである. このことは, $F_r = 800$ の場合にメンテナンスコストが大きくなることから確認できる. 一方, 故障率の増大に伴い, $F_r = 4,000$ の場合は, 提案手法と比較手法のメンテナンスコストの差が縮まり, $F_r = 800$ の場合には, 比較手法より, 提案手法のメンテナンスコストが大きくなるのがわかる. これは, 故障率の増加に伴い, データ収集トポロジにおける通信経路が分断されやすくなり, 提案手法のメンテナンスモードでの通信経路の修正が頻繁に行われるためである.

図 9 から, 提案手法と比較手法のデータ収集成功率がほぼ同等であることがわかる. この結果より, 特に $F_r = 4,000$ の場合には, 提案手法は, メンテナンスコストを削減しつつ, データ収集トポロジ全体を頻繁に再構築する比較手法と同等のデータ収集成功率を維持できることがわかる. また, 故障率の増大に伴い, 各手法のデータ収集成功率が低下していることがわかる. これは, 5.3 節で述べたとおり, 比較手法のデータ収集トポロジ再構築の周期と, 提案手法のメンテナンスモードの周期として, 故障率が 1[ppm] の時に, 比較手法のデータ収集成功回数が最も大きい値となった周期を用いているためである. そのため, 故障率が 1[ppm] より大きい環境で, この周期のままデータ収集トポロジのメンテナンスや再構築を行ってしまうと, 次のメンテナンスや再構築までに, データ収集トポロジ上のセンサ端末が故障する回数が増え, アプリケーションが要求するデータの収集に失敗しやすくなってしまふ.

図 10 より, 故障率の増大に伴って, 各手法のデータ収集成功回数が大幅に減少することがわかる. これは, 時間経過に伴って故障する端末が増加し, 結果としてシステムが

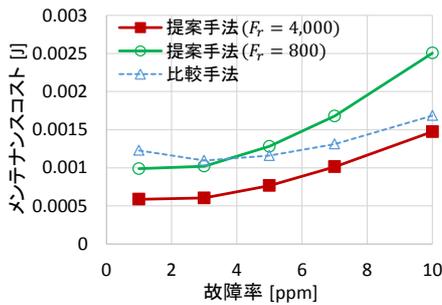


図 8 メンテナンスコスト

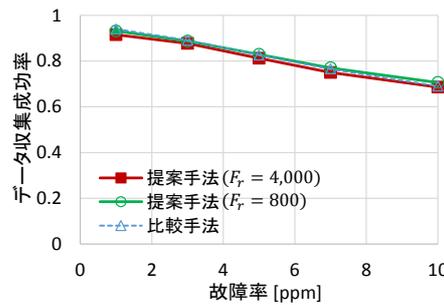


図 9 データ収集成功率

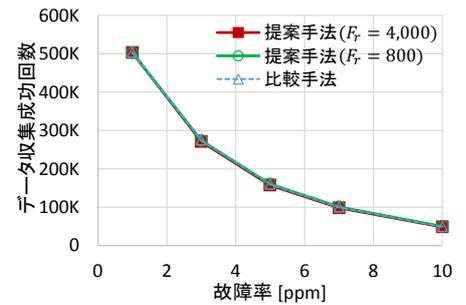


図 10 データ収集成功回数

早期に終了してしまうためである。つまり、各センサ端末の消費電力に関係なく、システムが終了してしまう。そのため、提案手法が $F_r = 4,000$ の場合には、比較手法よりもメンテナンスコストを削減できるにも関わらず、データ収集成功回数がほぼ同等になる。また、提案手法が $F_r = 800$ の場合には、比較手法と比較して、特に故障率が大きい場合にメンテナンスコストが大きいにも関わらず、データ収集回数がほぼ同等であるのも、上記と同様の理由である。ここで、収集するデータサイズが今回の評価環境よりも大きい環境など、センサ端末の故障でなく、センサ端末の電池切れによりシステムが終了する環境では、メンテナンスコストを削減することで、データ収集成功回数が増加する可能性がある。

6. おわりに

本稿では、スリープ制御を行いながらデータを収集する無線センサネットワークを対象に、センサ端末の故障などの不具合が発生した場合に、局所的にデータ収集トポロジをメンテナンスする手法を提案した。提案手法では、従来手法によって構築されたデータ収集トポロジ上のセンサ端末に故障が発生した場合に、故障端末が含まれる経路のみを修正することにより、メンテナンスに要する電力を削減しつつ、アプリケーションが要求するデータの収集に失敗する回数を可能な限り少なくする。シミュレーション結果より、提案手法は、データ収集トポロジの局所的なメンテナンスを行うことにより、センサ端末が故障する環境においても、消費電力を削減しつつ、アプリケーションが要求するデータの収集を継続できることを確認した。

提案手法は、トポロジ再構築や、メンテナンスモードの周期をあらかじめ決定する必要がある。しかし、センサ端末数や、アプリケーションの要求、センサ端末の故障率など、環境ごとに適切な周期は異なり、その値をシステム運用前に予測することは困難である。そこで、これらの周期を、環境に応じて動的に設定できるよう、手法の拡張を行う予定である。また、5.4 節で述べたような、センサ端末の故障でなく、センサ端末の電池切れによりシステムが終了する環境において、提案手法のさらなる性能評価も行う予定である。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究 (A)(26240013) および東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究によるものである。

参考文献

- [1] Bhaskaran, N., Naidu, G. B. and Gangadharan, R.: Galvanostatic Discharge of Lithium MnO₂ Button Cell: A Case Study, *Portugaliae Electrochimica Acta*, Vol. 469, p. 477 (2008).
- [2] Bulusu, N., Heidemann, J., Estrin, D. and Tran, T.: Self-configuring localization systems: Design and experimental evaluation, *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 24–60 (2004).
- [3] Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, No. 1, pp. 269–271 (1959).
- [4] Goto, K., Sasaki, Y., Hara, T. and Nishio, S.: A Mobile Agents Control Scheme for Multiple Sinks in Dense Mobile Wireless Sensor Networks, *Proc. MobiQuitous 2013*, pp. 52–65 (2013).
- [5] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *Proc. HICSS 2000*, pp. 1–10 (2000).
- [6] Jurdak, R., Ruzzelli, A. G. and O'Hare, G. M.: Radio sleep mode optimization in wireless sensor networks, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 9, No. 7, pp. 955–968 (2010).
- [7] Munir, A., Antoon, J. and Gordon-Ross, A.: Modeling and Analysis of Fault Detection and Fault Tolerance in Wireless Sensor Networks, *ACM Trans. on Embedded Computing Systems (TECS)*, Vol. 14, No. 1, p. 3 (2015).
- [8] 小路直紀, 松尾和哉, 神崎映光, 西尾章治郎: 無線センサネットワークにおけるデータ属性ごとの観測粒度と残余電力を考慮したトポロジ構築について, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2014) シンポジウム論文, pp. 1536–1546 (2014).