

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

小路 直紀¹ 松尾 和哉¹ 神崎 映光² 西尾 章治郎¹

概要：観測領域全体における複数の属性の環境情報を観測する環境モニタリングでは、属性ごとに設定した地理的な観測粒度を保証するように観測領域を分割し、分割された各領域（セル）ごとのデータを要求する場合が考えられる。本稿では、データ属性ごとの観測粒度と残余電力を考慮し、すべての属性のデータを長期間収集できるトポロジの構築手法を提案する。提案手法では、データ属性ごとに要求された観測粒度を基に分割されたセルごとに一台のセンサ端末からデータを収集する。このとき、稼働させる端末をネットワーク全体の接続性を考慮して決定することで、データ収集のための接続性を長期的に保証する。また、各属性に対応したセル内に存在するセンサ端末の残余電力の合計値を考慮し、この値を平滑化させる木構造ネットワークを構築することで、アプリケーションが要求する観測粒度を長期的に保証する。

1. はじめに

近年、無線通信技術の発展やセンサの小型化に伴い、無線通信機能を備えたセンサ端末のみによって構成される無線センサネットワークに関する研究への関心が高まっている [6]。無線センサネットワークでは、所望の情報をセンシングするセンサ端末を導入することで、温度や湿度、光、加速度といったさまざまな属性の情報を取得できる。

無線センサネットワークでは、無線マルチホップ通信を用いて、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で、サービスを提供する。そのため、各センサ端末から基地局までの通信経路を構築する必要がある。また、電池駆動のセンサ端末を用いることが一般的であるため、サービスを長期間提供するためには、センサ端末の省電力化が重要である。

無線センサネットワークの代表的なアプリケーションである、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、観測領域内にセンサ端末を大量に配置することが一般的である。一方、アプリケーションの観点からは、多数の同じデータは必要なく、これらのデータをすべて収集すると大量の通信が発生し、各センサ端末の消費電力が増大してしまう。むしろアプリケーションは、観測領域を分割し、分割された各領域（以降、セル）ごとのデータといった、ある一定の地理的粒度（以降、観測粒度）のデータを要求する場合は多いものと考えられる [2]。この場合、観

測粒度を保証するために各セルから1台ずつセンサ端末を選出し、その端末のみからデータを収集できれば十分である。この観点から、観測粒度の保証に必要な最小限のセンサ端末のみを稼働させ、残りのセンサ端末を休止状態とすることで、ネットワーク全体の消費電力を抑制するスリープ制御手法 [3] に関する研究が盛んに行われている。ここで、観測粒度のみを考慮してスリープ制御を行った場合、特に要求される観測粒度が疎な場合において、稼働したセンサ端末のみでは基地局までの通信経路が作成できず、アプリケーションの要求を満たせない場合がある。この場合、各センサ端末と基地局との間における接続性を考慮したスリープ制御 [9] を適用することで、消費電力を削減しながらデータ収集のための通信経路を作成でき、アプリケーションの要求を長期間満足できる。

ここで、環境モニタリングでは、複数の属性の環境情報を観測することも十分に考えられる。この場合、気温は細かい観測粒度で要求する一方、気圧は粗い観測粒度で収集できれば十分な場合など、アプリケーションが要求する各属性の観測粒度がすべて等しいとは限らない。また、各センサ端末の価格や小型化の観点から、それぞれ一つの属性のみを観測できるセンサ端末を組み合わせ、所望の情報を取得し、データを収集することも考えられる。この場合、各属性の各セル（以降、属性セル）で一台ずつ、対応する属性のデータを観測可能なセンサ端末を稼働させ、それらのセンサ端末からデータを基地局に収集できれば、アプリケーションの要求を満足できる。本稿では、このように全属性において、観測粒度と接続性が同時に保証されている

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科

期間をシステム継続期間と呼ぶ。しかし、観測対象となる環境情報の属性が複数であることや、属性ごとに観測粒度が設定されるアプリケーションを考慮していない既存のスリープ制御手法を単純に適用した場合、ある属性のセル内のすべてのセンサ端末の電池が早くに切れてしまう経路が作成されることがある。この場合、その属性の観測粒度を保証できなくなり、システム継続期間が短くなるという問題が発生する。

そこで本稿では、データ属性ごとの観測粒度と残余電力を考慮し、システム継続期間を長期化させるトポロジの構築手法を提案する。提案手法では、各属性セル内でデータを取得/送信するセンサ端末である代表端末の決定と、各代表端末からデータを収集する木構造ネットワーク(転送木)の構築の二つの処理を基地局が行い、アプリケーションが要求するすべてのデータを長期間収集するためのトポロジを構築する。まず、代表端末を決定するための手法として、接続性を考慮したスリープ制御手法である GAF (Geographical Adaptive Fidelity) [9] を利用する GCE (GAF Cell Energy) 法を提案する。GAF では、センサ端末の通信半径に基づいて、観測領域を複数の矩形領域(以降、GAF セル)に分割する。隣接する GAF セル内のすべてのセンサ端末同士が直接通信できるように GAF セルを設定するため、各 GAF セル内で一台のセンサ端末さえ稼働していれば、ネットワーク全体の接続性を保証できる。GCE 法では、各 GAF セル内に存在する端末の残余電力の合計値として GAF セル電力を定義し、各属性セル内において、自身が存在する GAF セルの GAF セル電力が高いセンサ端末を代表端末とすることで、すべての属性の接続性を長期間保証しつつ、観測粒度を保証する。さらに、転送木を構築する手法として、各属性セル内のセンサ端末の残余電力の合計値として属性セル電力を定義し、これを考慮した ACE (Attribute Cell Energy) 法を提案する。ACE 法では、属性セル電力を平滑化する転送木を構築することで、各属性の観測粒度を長期間保証する。

以降では、2章で本稿の想定環境について述べ、3章で関連研究を紹介する。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

本稿では、複数の異なる属性のデータを観測するセンサ端末群から構築された無線センサネットワークにおいて、各属性のデータを収集するための転送木を、基地局が構築する環境を想定する。

2.1 基地局とセンサ端末

観測領域内に、一つの基地局と複数の属性のセンサ端末が存在するものとする。センサ端末は飛行機等から散布

することを想定しており、観測粒度に対して密に配置されているものとする。各センサ端末は一意的識別子が割り当てられており、各センサ端末の計算能力やメモリ容量、電池容量、通信範囲などの性能は同等であるものとする。各センサ端末は、温度や湿度、気圧、光などの物理現象をセンシングするが、各センサ端末がセンシングできる属性はそれらのうち一つのみであるものとする。

各センサ端末間の通信は、センシング可能な属性に関係なく相互に可能とし、データの送受信で電力を消費するものとする。なお、各センサ端末は、データの送受信において特に多くの電力を消費することが知られており [10]、議論の簡単化のため、センシング時、休止状態、およびスリープ制御における状態遷移等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、GPS や文献 [1] のような既存プロトコルにより、各センサ端末は自身および全隣接端末の識別子と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、位置、センシング可能なデータの属性および送受信による消費電力モデルを予め把握しているものとする。

2.2 観測領域とアプリケーションの要求

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、データを要求する各属性 $a_k (k = 1, 2, \dots)$ に対して、 $G_{a_k}^2 \cdot M \cdot N (G_{a_k} = 1, 2, \dots)$ 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 $G_{a_k} \cdot M \times G_{a_k} \cdot N$ の格子状の属性セルに分割し、定期的に各属性セルのデータを要求する。ここで設定される時間的な観測周期はすべての属性において等しいものとし、すべての属性のデータは同時に収集されるものとする。

各属性セル内に位置するセンサ端末のうち、該当する属性のデータをセンシング可能なセンサ端末を、その属性セルに属するセンサ端末と表現する。各属性セルにおいて、その属性セルに属するセンサ端末がセンシングしたデータは、その属性セルのデータとして扱い、図 2 に示すように、各属性セルにおいて一つのセンサ端末がセンシングしたデータが収集できれば、アプリケーションの要求が満たされるものとする。ここで図 2 では、色の違うセンサ端末は互いにセンシング可能な属性が異なることを表す。

3. 関連研究

文献 [9] で提案されている GAF では、ネットワーク全体の接続性を保証できる最低限の端末のみを稼働させる。具体的には、センサ端末の通信半径に基づいて、観測領域を複数の GAF セルに分割し、各 GAF セル内で一台のみ端

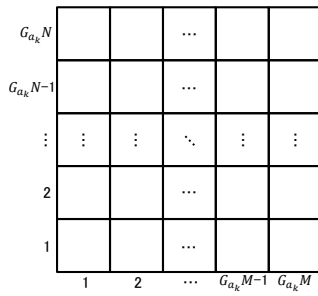
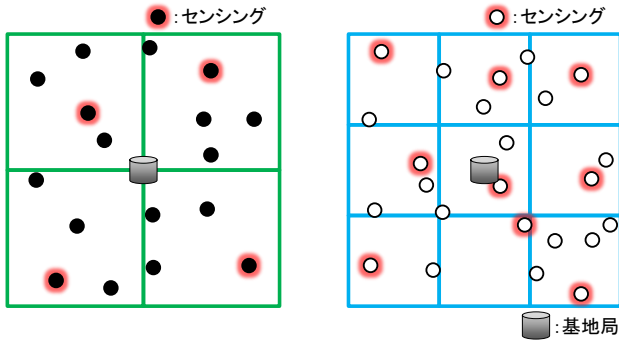


図 1 観測領域と属性セル



(a) 属性 a_1 (観測粒度: 2×2) (b) 属性 a_2 (観測粒度: 3×3)

図 2 各属性セルのデータとして有効なデータをセンシング可能な端末の例

末を稼働させることで、稼働端末数を削減する。GAF では、隣接する GAF セル内のすべてのセンサ端末同士が直接通信できるように、各センサ端末の通信半径 r に対し、GAF セルの一辺の長さ l_G を、以下の式を満たすように設定する。

$$l_G \leq \frac{r}{\sqrt{5}}. \quad (1)$$

このように GAF セルを設定することにより、各 GAF セル内で一台のセンサ端末さえ稼働していれば、ネットワーク全体の接続性を保証でき、稼働端末数を削減できる。しかし GAF では接続性のみを考慮しており、アプリケーションがある一定の観測粒度を要求する環境を想定していない。

文献 [4] では、各センサ端末における残余電力の平滑化を行うために、階層構造をもつトポロジを構築する LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) が提案されている。LEACH では、各センサ端末を複数のクラスタに分類し、各クラスタでクラスタヘッドと呼ばれる上位のセンサ端末を一台ずつ決定する。各センサ端末は、自身が属するクラスタのクラスタヘッドにデータを送信する。クラスタヘッドは受信したデータを集約して基地局に送信する。さらにクラスタヘッドをクラスタ内で適宜交代させることで、特定のセンサ端末に負荷が集中することを防ぐ。文献 [8] では、LEACH におけるクラスタ内の残余電力を平滑化する PEDAP-PA (Power Efficient Data gathering

and Aggregation Protocol - Power Aware) が提案されている。PEDAP-PA では、送信電力に基づいて決定した値を各センサ端末の残余電力で割った値をセンサ端末間のコストとして設定する。このコストを基に、クラスタ内で構築した最小全域木に添ってクラスタヘッドにデータを送信することで、クラスタ内の総消費電力を削減しつつ残余電力の平滑化を実現する。文献 [5] では、各センサ端末の無線通信による負荷を分散するトポロジを構築する MITT (Maximum Lifetime Tree construction for data gathering without aggregation) が提案されている。MITT では、各センサ端末の初期残余電力に差がある環境を想定し、幅優先探索により構築したトポロジ上で、残余電力が多いセンサ端末に通信の負荷がかかるように、各センサ端末の親を変更する動作を繰り返す。

これらの既存研究は、すべてのセンサ端末からデータを収集することを目的としており、アプリケーションがある一定の観測粒度を要求することを想定していない。

4. 提案手法

本章では、まず提案手法の概要について述べる。次に、提案手法の設計方針を述べ、その後、提案手法の詳細な手順について説明する。

4.1 提案手法の概要

2.1 節で述べたように、基地局は全センサ端末の識別子、位置、センシング可能なデータの属性および送受信による消費電力モデルを予め把握している。提案手法では、これらの情報を基に、基地局においてデータを収集するためのトポロジを構築する。具体的には、4.4 節で述べる GCE 法によって、基地局が各属性セル内で代表端末を決定し、4.5 節で述べる ACE 法によって、各代表端末からデータを収集する転送木を構築する。その後、構築したトポロジの情報をネットワーク全体に通知し、各センサ端末がその情報に従ってデータの収集を行う。

また、基地局においては、4.6 節で述べる方法に従って、構築した転送木を用いたデータ収集のシミュレーションを行い、各センサ端末の消費電力を算出する。一度トポロジを構築すると、同じトポロジでデータ収集を続け、基地局における計算上で電池切れのセンサ端末が生じた時点で、そのトポロジでのデータ収集を終了する。そして、その状態での各センサ端末の残余電力を基に、次の代表端末の決定と、転送木の再計算を行う。アプリケーションが要求するすべてのデータが収集できなくなるまで、この処理を繰り返す。

なお、本章では、図 2 に示すように、属性 a_1 と属性 a_2 の二種類のデータを収集し、 $M = 1, N = 1, G_{a_1} = 2, G_{a_2} = 3$ である環境を用いて、提案手法の動作を説明する。

4.2 設計方針

まず提案手法では、各属性セルに対し代表端末を1台ずつ選出する。代表端末は自身のデータを送信する必要があり、そのための電力を必ず消費する。ここで、各属性セルに属するセンサ端末間の残余電力を平滑化することを目的に、属性セルに属するセンサ端末のうち、最も残余電力が大きいものを代表端末として選出することが考えられる。しかし、この方法では、代表端末となったセンサ端末の電池が切れたとき、ネットワーク全体の接続性が保証できなくなる可能性がある。そのためGCE法では、ネットワーク全体の接続性を長期間保証できるように、GAFにおけるスリープ制御を応用した代表端末の決定を行うことで、システム継続期間の長期化を図る。

次に提案手法では、各代表端末から基地局までのデータ収集を行うための木構造ネットワークを構築する。木構造に参加するセンサ端末は、パケットの中継によって電力を消費する。ここで、1章で述べたように、複数の属性の環境情報を観測する場合、アプリケーションが要求する各属性の観測粒度がすべて等しいとは限らない。属性ごとに要求される観測粒度が異なる場合、属性セルに属するセンサ端末数が、データ属性間で大きく異なる場合がある。このような環境を考慮せず、各センサ端末の残余電力の平滑化を目的とした既存のトポロジ構築手法を単純に適用した場合、ある属性における属性セル内のすべてのセンサ端末の電池が早くに切れてしまう経路が作成される可能性がある。この場合、その属性の観測粒度を保証できなくなり、結果としてシステム継続期間が短くなるという問題が発生する。ACE法では、上記の問題を解決するために、各属性セルに属するセンサ端末の残余電力を考慮した転送木を構築する。具体的には、各属性セルに属するセンサ端末の残余電力の合計値として属性セル電力を定義し、属性セル電力が低い属性セルに属するセンサ端末が中継端末になりにくい転送木を構築することによって、それらの属性セルにおける消費電力を抑制し、システム継続期間を長期化する。

4.3 セル電力

提案手法では、代表端末の決定、および転送木の構築のそれぞれにおいて、GAFセル電力および属性セル電力を用いる。以下では、それぞれの詳細について述べる。

4.3.1 GAFセル電力

GAFセル電力は、データ属性に関係なく、GAFセル内に位置するすべてセンサ端末の残余電力の合計値である。図3(a)は、あるGAFセルにおけるGAFセル電力の例を示している。この図において、鎖線はGAFセルを表し、各センサ端末の残余電力を各センサ端末に付与した吹出しで表す。図に示すとおり、このGAFセルのGAFセル電力は、GAFセル内に位置する各センサ端末の残余電力の合計値である $300[\text{mAh}] (= 180 + 120)$ となる。

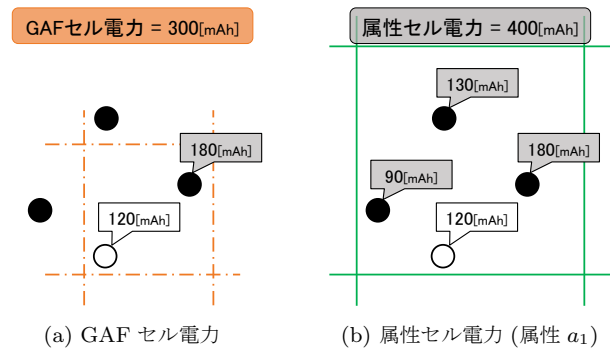


図3 セル電力の例

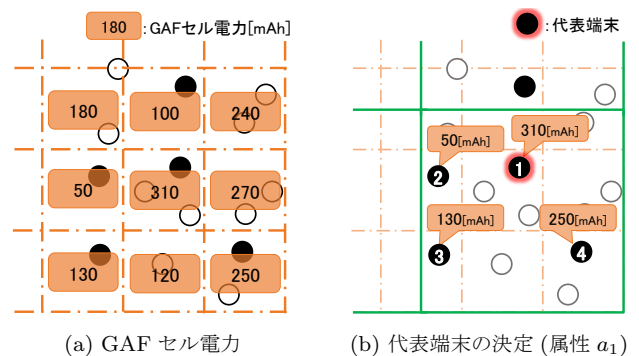


図4 GCE法における代表端末の決定

4.3.2 属性セル電力

属性セル電力は、属性セルに属するすべてのセンサ端末の残余電力の合計値である。図3(b)は、属性 a_1 のある属性セルにおける属性セル電力の例を示している。この図において、実線は属性 a_1 の属性セルを表す。図に示すとおり、この属性セルの属性セル電力は、属性 a_1 のセンサ端末の残余電力の合計値である $400[\text{mAh}] (= 130 + 90 + 180)$ となる。

4.4 代表端末の決定：GCE法

GCE法では、各属性セルに属するセンサ端末のうち、4.3.1項で述べたGAFセル電力が最も高いGAFセル内に位置するものを代表端末とすることで、特定のGAFセルに負荷が集中することを防ぎ、接続性保証の長期化を図る。

例として、各GAFセルにおけるGAFセル電力が図4(a)で与えられている場合を考える。図4(b)では、図4(a)に示すセンサ端末のうち、属性 a_1 のある属性セルに属するセンサ端末を示し、各センサ端末に付与された吹出しは、そのセンサ端末が位置するGAFセルのGAFセル電力を示している。この属性セル内では、センサ端末1のGAFセル電力が最も高いため、このセンサ端末が当該属性セルの代表端末となる。

4.5 転送木構築：ACE 法

ACE 法では、代表端末からデータを収集するための転送木をダイクストラ法により構築する。ダイクストラ法は、各辺にコストが与えられているグラフにおいて、2 頂点間のコストが最小となる経路を構築するためのアルゴリズムである。ACE 法では、稼働可能なセンサ端末全てを対象とし、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が属する属性セルの属性セル電力の逆数に設定する。これにより、属性セル電力の大きいセンサ端末を経由する辺のコストを小さく設定し、転送木の節点として選択されやすくなる。

図 5 および図 6 を用いて、コストの設定例を示す。図 5 は、属性 a_1 , a_2 それぞれにおける各属性セルの、ある時点における属性セル電力を表している。このとき、図 6 のセンサ端末 1 を始点とした各辺のコストは、図中の吹出しで示す値となる。このようにコストを設定して、ダイクストラ法によりすべての代表端末と基地局間に対して経路を構築する。この処理により転送木の節点として選択されたセンサ端末および代表端末以外のセンサ端末は、データ収集に不要であると判断し、その時点のデータ収集においては休止状態とする。これにより、各属性セル電力の浪費を抑制する。

図 7 に、属性 a_2 のある属性セルにおける代表端末 2 からの通信経路を、ACE 法により構築した場合、および単純にホップ数が最小となる経路を構築した場合の例を示す。図中で転送経路上の各端末に付与された吹出しは、その端末が属する属性セルの属性セル電力を表す。図に示すように、属性セル電力をコストに用いる ACE 法における通信経路のホップ数が、ホップ数が最小となる経路より大きくなる場合がある。しかし、ホップ数が最小となる経路では、代表端末 2 と基地局間の経路において、属性セル電力が少ない属性セルに属するセンサ端末がデータの中継を担っている。これに対し ACE 法では、経路上のセンサ端末における属性セル電力が高い。すなわち ACE 法では、転送木全体で属性セル電力が高い属性セルに属するセンサ端末がデータの中継を担うことで、属性セル電力が低い属性セルに属するセンサ端末は自身のデータの送信に専念でき、結果として、属性セル間の残余電力を平滑化できる。

4.6 データ収集のシミュレーション

上記の処理によって代表端末および転送木を構築した基地局は、構築したトポロジを用いたデータ収集のシミュレーションを行い、各センサ端末の消費電力を算出する。このように基地局において行った計算上で電池切れのセンサ端末が生じた時点で、トポロジの再計算を行う。データ収集の方法については任意のものを用いることが可能であるが、本稿では、構築した転送木上において、基地局からのホップ数が大きいセンサ端末から順にパケットを送信し、

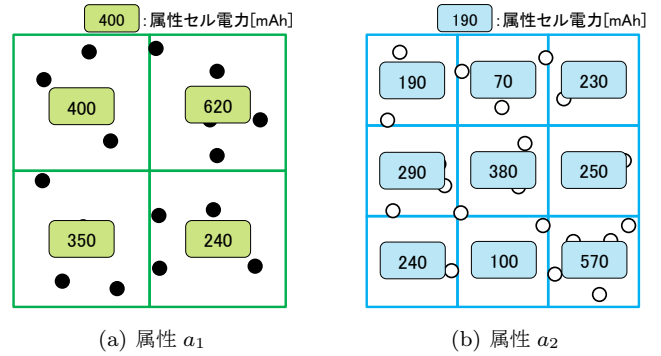


図 5 属性セル電力

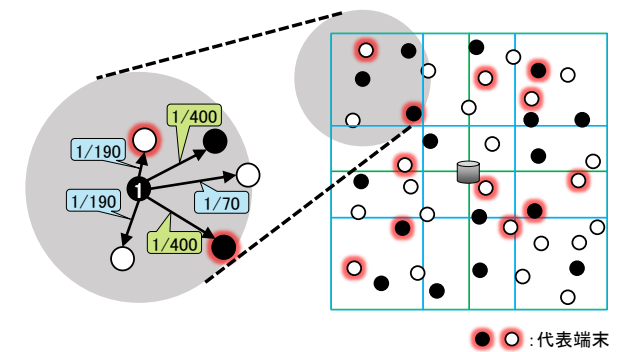


図 6 隣接端末間のコストの設定例

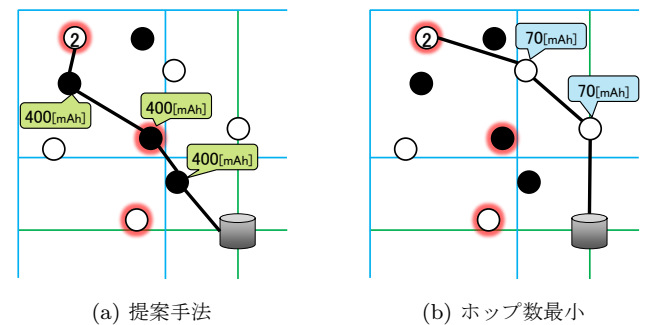


図 7 代表端末と基地局間の経路の例

各節点でデータを一つのパケットに集約しながらデータを葉端末から基地局へ収集する方法を用いるものとする。

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。

5.1 評価環境

実験では、 $100[m] \times 100[m]$ の二次元平面に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。観測対象とする属性は $\{a_1, \dots, a_5\}$ の 5 種類とし、それぞれの属性をセンシング可能な端末数はすべて 200 台とした。アプリケーションが要求する各属性の観測粒度は、表 1 に示す属性セル数で表されるものとした。すなわち、

表 1 各属性の観測粒度

属性 a_k	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
属性セル数	10×10	8×8	6×6	5×5	4×4

表 2 送受信電流

送信電流	18.2[mA]
受信電流	20.4[mA]

表 3 通信特性

送信電力定数 $E_{Tx-elec}$	218.4[nJ/bit]
受信電力定数 $E_{Rx-elec}$	244.8[nJ/bit]
増幅定数 ϵ_{amp}	100[pJ/bit/m ²]

属性 a_1 における観測粒度が最も細くなる。

センサ端末間の通信は ZigBee を想定し、伝送速度 250[kbps]、ヘッダサイズ 27[B]、ヘッダを含む最大パケットサイズは 127[B] 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[B] とした。センサ端末の初期電池容量は 220[mAh] とし、パケット送受信時の電流は文献 [7] を基に、表 2 で表されるものとした。また、通信時の消費電力モデルは文献 [4] を基に次の式で表されるものとした。

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

$$E_{Rx}(D, r) = E_{Rx-elec} * D. \quad (3)$$

$E_{Tx}(D, r)$ [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、送信電力定数 $E_{Tx-elec}$ [J/bit]、受信電力定数 $E_{Rx-elec}$ [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。

以上の評価環境でシミュレーション実験を行い、システム継続期間として、全属性セルからデータが基地局に収集された回数を評価した。すなわち、一つでもデータが収集できない属性セルが生じた時点で、アプリケーションの要求が満たせなくなったとして、システムが終了となる。

なお、センサ端末には、無線デバイスの送信電力を制御できるものも数多く存在し、一般に送信電力を大きくすると、通信半径が大きくなることが知られている。ここで、各センサ端末の通信半径が大きくなると、隣接端末数が多くなる。この場合、ACE 法において選択できる通信経路が多様となり、属性セル電力の平滑化により有効なトポロジが構築でき、システム継続期間がさらに長期化できるものと考えられる。一方、送信電力を大きくした場合、一回のパケット送信に要する消費電力も増大する。本章では、これらの影響を検証するため、各センサ端末の通信半径 r を [10, 30][m] の範囲で変化させた場合の性能を評価した。

5.2 ACE 法の評価

ACE 法では、属性セル電力が低い属性セルに属するセ

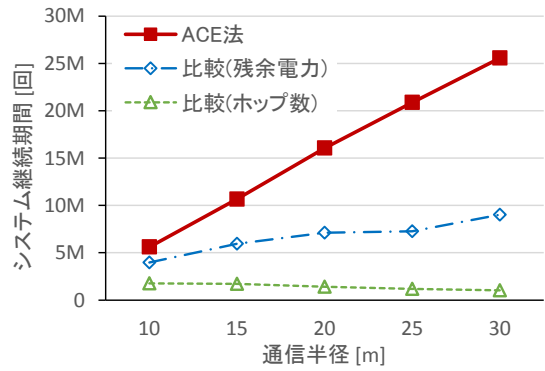


図 8 ACE 法の評価

ンサ端末が中継端末になりにくい転送木を構築することにより、システム継続期間の長期化を図っている。この処理による効果を検証するために、複数の属性を考慮せずに転送木を構築する方法を比較対象とし、その性能を提案手法と比較した。

5.2.1 比較手法

比較手法では、まず GCE 法によって代表端末を決定する。転送木構築の時に用いる隣接端末間のコストとしては、すべて等しい値に設定した手法と、ACE 法と同様に方向付きの辺を与え、その辺の終点となるセンサ端末の残余電力の逆数をコストに設定し、これに基づいてダイクストラ法によって転送木を構築する手法の二つを用いた。前者の手法では、各代表端末から基地局までのホップ数が最小となる転送木が構築される。つまり、各代表端末が観測した個々のデータが、最小の消費電力で基地局に転送される。以降では、この手法を「比較 (ホップ数)」と表記する。一方、後者の手法では、データの属性に関わらず、全センサ端末の残余電力を平滑化する経路が構築される。以降では、この手法を「比較 (残余電力)」と表記する。

5.2.2 評価結果

図 8 に、システム継続時間の実験結果を示す。グラフの横軸は通信半径 r を表し、縦軸はシステム継続時間を表す。

結果より、提案手法のシステム継続期間が、比較手法よりも常に長くなることがわかる。また、通信半径の増加に伴い、提案手法と比較 (残余電力) におけるシステム継続期間が長くなる傾向にあることがわかる。これは通信半径の増加により、基地局の隣接端末が増加することで長期間接続性を保証でき、さらに、ネットワーク全体で中継端末として稼働する端末数が減少するためである。この結果から、提案手法および比較 (残余電力) では、送信時の消費電力の増加による影響よりも、基地局の隣接端末の増加や、中継端末の減少による影響のほうがシステム継続期間に与える影響が大きいことがわかる。一方、比較 (ホップ数) のシステム継続期間は、通信半径の増加に伴って短くなることわかる。ホップ数が最小となる転送経路を組み合わせて転送木を構築した場合、一部のセンサ端末が多く

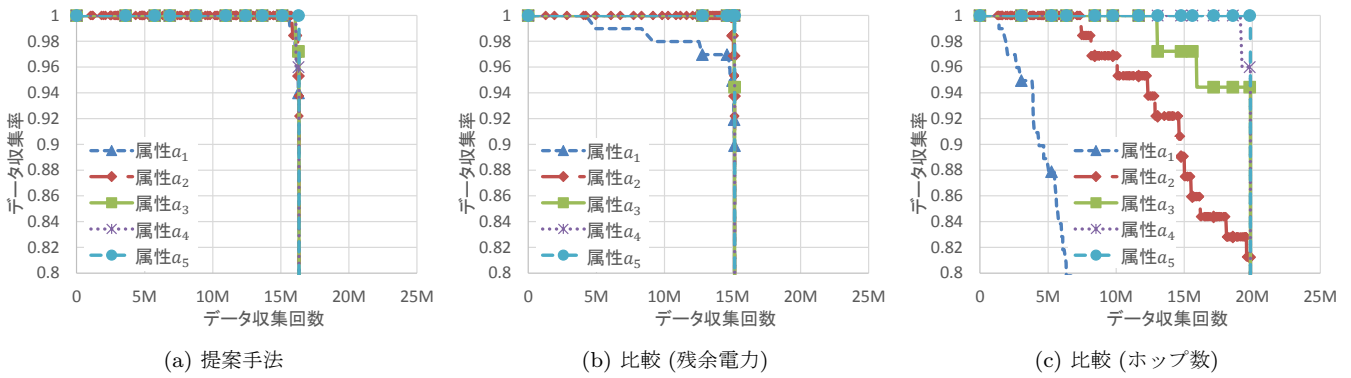


図 9 データ収集率の推移

のデータを受信する転送木が構築されやすくなる。そのため、通信半径の増加に伴い、各センサ端末の隣接端末数が増加し、一部のセンサ端末にかかる負荷がより大きくなる。ここで、属性セル電力が少ない属性セルに属するセンサ端末に負荷が集中した場合、システム継続期間が短くなる。

ここで、比較手法においてシステム継続期間が短くなる原因として、属性セル電力が小さい、すなわち観測粒度の細かい属性のデータが早期に収集できなくなることが予想される。この場合、システム継続期間後も、他の属性のデータが収集できる可能性がある。アプリケーションの観点からはこれらのデータは不要であり、すべての属性において観測粒度が保証できなくなる時点が近くなることが望ましい。すなわち、システム継続期間後に、他の属性のデータが収集できることは、各センサ端末の電力を有効に利用できていないことを示す。このことを検証するため、各手法におけるデータ収集率の時間的変化を評価した。ここでデータ収集率とは、各属性において要求される観測粒度に対し、収集できたデータ数の割合を表す。

各センサ端末の通信半径 r が 20[m] の場合の、各手法のデータ収集率の推移を図 9 に示す。グラフの横軸は基地局がデータを収集した回数（データ収集回数）を表す。

この結果より、各手法で、ある時点においてデータ収集率がすべての属性で急激に減少することがわかる。これは、基地局の隣接端末がすべて電池切れになることで、基地局がネットワークから分断され、データの収集が不可能になるためである。図 9(c) の結果より、比較（ホップ数）では、データ収集開始直後に属性 a_1 の観測粒度が維持できなくなり、その後観測粒度の細かい属性から順にデータ収集率が低下することがわかる。この結果より、比較（ホップ数）では、各センサ端末の残余電力や、各属性の観測粒度を全く考慮せずに転送木を構築するため、属性セルに属するセンサ端末数が少ない属性から順に観測粒度が維持できなくなることがわかる。一方、図 9(b) の結果より、比較（残余電力）では、データ収集回数が 500 万回を超えると、最も粒度が細かい属性 a_1 のデータ収集率が低下する

ことがわかる。このことから、全センサ端末の残余電力の平滑化だけでは、すべての属性の観測粒度を長期間保証することが困難であることがわかる。最後に図 9(a) の結果より、提案手法ではデータの収集が完全に不可能になる直前まで、すべての属性において高いデータ収集率を示すことがわかる。この結果より、ACE 法では、属性セル電力の平滑化を行うことにより、各センサ端末の電力を無駄なく利用し、すべての属性の観測粒度を長期間保証できることがわかる。

5.3 GCE 法の評価

GCE 法では、ネットワークの接続性を長期間保証するため、GAF セル電力が高い GAF セルに属するセンサ端末を優先的に代表端末としている。一方、4.2 節で述べたように、属性セル内のセンサ端末間で残余電力を平滑化することも有効である可能性がある。そこで、各属性セルに属するセンサ端末間で残余電力を平滑化するような代表端末の決定方法による性能も評価し、GCE 法との比較を行った。この手法（以降、比較手法）では、各属性セルにおいて、残余電力が最も大きいセンサ端末を代表端末とする。なお、転送木の構築については、ACE 法を用いるものとした。

図 10 に、システム継続期間の実験結果を示す。グラフの横軸は通信半径 r を表し、縦軸はシステム継続時間を表す。

結果より、通信半径の大小に関わらず、代表端末の決定方法がシステム継続期間に与える影響がほぼないことがわかる。これは、図 9(a) に示すとおり、提案手法におけるシステム継続期間終了時点で、基地局の全隣接端末が電池切れとなることに起因するものと考えられる。このことは通信半径 r が 20[m] の場合以外でも同様に生じる。GCE 法による代表端末の決定は、ネットワーク全体の接続性を長期間保証することを目的としているが、今回の環境におけるシステム継続期間は基地局周辺の接続性に依存する。そのため、GCE 法と比較手法との性能差が現れる前に、システム継続期間が終了しているものと考えられる。ここで、基地局周辺ほど多数のセンサ端末を配置するなど、ネット

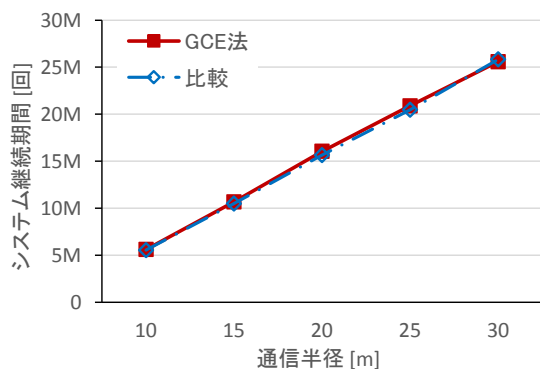


図 10 GCE 法の評価

ワーク全体の接続性がシステム継続期間に大きく影響を与える環境であれば、GCE 法により、システム継続期間が長期化できるものと考えられる。

6. おわりに

本稿では、複数の属性データを収集する無線センサネットワークを対象に、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手法を提案した。

提案手法では、GCE 法により、各属性セルのデータを取得/送信する代表端末を、接続性を長期間保証できるように決定する。そして、ACE 法により、各属性セルに属するセンサ端末の残余電力の合計値である属性セル電力を考慮して、属性セル電力が低い属性セルに属するセンサ端末は中継端末になりにくい転送木を構築することで、システム継続時間の長期化を図る。

性能評価のために行った実験の結果から、提案手法はデータ属性ごとに観測粒度が指定される環境において、システム継続期間を長期化できることを確認した。

提案手法はパケットロスが発生する環境を想定しておらず、パケットの再送制御で消費する電力を考慮せずに転送木を構築している。そこで、今後は、パケットロスを考慮した提案手法の拡張を検討する予定である。また、センサ端末に搭載されているセンサデバイスの不具合や測定環境が原因としたノイズの影響によって、実際の値とは異なる値をセンシングすることが考えられる。そこで、観測値の誤差や外れ値を考慮した提案手法の拡張を検討する予定である。また、GCE 法による代表端末の決定は、5.1 節における評価環境では、システム継続期間に大きな影響を与えないことが明らかとなった。しかし、ネットワーク全体の接続性がシステム継続期間に大きく影響を与える環境においては、代表端末の決定方法により性能が大きく変化する可能性がある。そこで、センサ端末の配置や初期電力等を変化させるなど、多様な環境でシミュレーション実験を行い、提案手法の性能をより詳細に評価する予定である。

参考文献

- [1] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, and T. Tran, "Self-configuring localization systems: Design and experimental evaluation," *ACM Trans. Embedded Computing Systems*, vol.3, no.1, pp.24–60, 2004.
- [2] K. Goto, Y. Sasaki, T. Hara, and S. Nishio, "A mobile agents control scheme for multiple sinks in dense mobile wireless sensor networks," *Proc. MobiQuitous 2013*, 2013.
- [3] J. Hao, B. Zhang, and H.T. Mouftah, "Routing protocols for duty cycled wireless sensor networks: A survey," *Communications Magazine*, vol.50, no.12, pp.116–123, 2012.
- [4] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proc. HICSS 2000*, pp.1–10, Jan. 2000.
- [5] L. Junbin, W. Jianxin, C. Jiannong, C. Jianer, and L. Mingming, "An efficient algorithm for constructing maximum lifetime tree for data gathering without aggregation in wireless sensor networks," *Proc. IEEE IN-FOCOM 2010*, pp.1–5, 2010.
- [6] N.A. Pantazis, S.A. Nikolidakis, and D.D. Vergados, "Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey," *Communications Surveys & Tutorials*, vol.15, no.2, pp.551–591, 2013.
- [7] M. Takahashi, "Evaluation of energy efficient medium access control (MAC) protocol for data-intensive sensor networks," *Proc. Symposium on Graduate Research and Scholarly Projects (GRASP)*, pp.187–188, 2010.
- [8] H.Ö. Tan and I. Körpeoğlu, "Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks," *ACM SIGMOD Record*, vol.32, no.4, pp.66–71, 2003.
- [9] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing," *Proc. IEEE/ACM MobiCom 2001*, pp.70–84, 2001.
- [10] Z. Yuan, L. Wang, L. Shu, T. Hara, and Z. Qin, "A balanced energy consumption sleep scheduling algorithm in wireless sensor networks," *Proc. Int'l Wireless Communications & Mobile Computing Conf.*, pp.831–835, 2011.