

無線センサネットワークにおける データ集約方式に関する考察

河合 佑介^{†1} 李 烏雲格日樂^{†1} 木谷 友哉^{†2}
萬代 雅希^{†3} 渡辺 尚^{†1}

近年, 無線通信機能とセンサを備えた多数の端末を観測エリアに配置して観測情報の収集を行う無線センサネットワーク (WSN) が注目されている. WSN は複数の端末でマルチホップ通信を用いており, 基地局に近いほど特に通信が集中するため, バッテリが早期枯渇して基地局へ無線通信を行うことができなくなり, ネットワーク寿命が尽きる問題がある. この問題の解決策として, 省電力化の手法としてデータ集約が提案されている. これは, パケットを中継する際に複数のパケットを1つに集約することにより, データ量を削減する手法である. データ集約は省電力化を達成するが, 中継ノードでの待ち時間が大きくなり, 遅延が増加する問題が生じる. 本稿では, 中継ノードでの集約待ち時間に上限をつける方式を提案し, 計算機シミュレーションにより遅延を抑えつつ省電力化を実現可能であることを示す.

Study on Data Aggregation in Wireless Sensor Network

YUSUKE KAWAI,^{†1} WUYUNGERILE LI,^{†1}
TOMOYA KITANI,^{†2} MASAKI BANDAI^{†3}
and TAKASHI WATANABE ^{†1}

Recently, wireless sensor networks (WSNs) attract researchers' attention because of its wireless communication ability and target detecting ability by deploying multi sensors in detecting area. In WSNs, data are transmitted by multi-hop way, so the amount of data transmission becomes larger for the nodes near to sink node. More data transmission leads fast battery-exhausted of sensor nodes so that shortens network lifetime. Data aggregation is one of energy saving schemes. In data aggregation, sensor node aggregates multi sensed data into one data before relaying so that reduce the number of data. However data aggregation leads transmission delay because of the long waiting time at relay nodes. In this paper, we set an upper bound to the waiting time of data

aggregation at relay node. Performance evaluation is achieved by comport simulation and the result confirms the efficiency of data aggregation with time upper bound.

1. はじめに

近年, 無線センサネットワーク (WSN)¹⁾ が注目されている. WSN ではセンサが観測した温度, 湿度, 照度, 音の情報をマルチホップを用いて基地局に集めることにより, 様々なサービスを提供する. 例えば, 火災・地震・洪水・土砂崩れなどの都市・自然災害の監視サービスが挙げられる. WSN を運用するにあたり, ノードのバッテリー制約は重要な問題である. バッテリが枯渇したノードはバッテリー交換などのメンテナンスが必要であるが, 森林や水中などの観測エリアの地理的条件によりメンテナンスを行うことが困難な場合は, バッテリ枯渇後は使用不能になる. 消費電力の多くは通信時に消費されるため, 通信に要する電力を削減してノードの稼働時間を延ばすことが課題である.

この問題に対処するため, 通信距離を短縮するプロトコルとして LEACH²⁾ や HEED³⁾ が提案されている. 消費電力は通信距離の2乗に比例するため, 通信距離を減らせば中継ノード数が増えても省電力化が期待できる. また, 効率的なデータ収集によって省電力を実現するプロトコル⁴⁾⁵⁾ も提案されている. さらに, データ量を削減するためのプロトコル⁶⁾⁷⁾ が提案されている. その中でも, データ集約⁸⁾⁹⁾ は中継ノードで複数のパケットを1つに集約することで, パケット数の削減により省電力効果が期待できる. しかし, 中継ノードでパケットを待つ必要があるため, 遅延が増加するという問題点がある. 本研究では, この問題をまず分析し, 中継ノードでパケットを待つ時間に上限を設定して, これを超えた場合は集約せずに送信する方式を提案する. 評価により, 省電力効果と遅延時間の改善を示す.

2. データ集約

データ集約は, 複数のパケットを1つに集約することでパケット数が削減され, データ量も削減される. まず, データ集約方式を分類し, 集約率について考察する.

^{†1} 静岡大学大学院情報学研究所

Graduate School of Informatics, Shizuoka University

^{†2} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

^{†3} 上智大学 理工学部

Faculty of Science and Technology, Sophia University

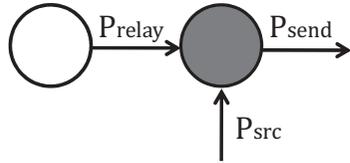


図1 WSNの送受信モデル

2.1 集約方式の分類

ここでは、集約時のデータ構造、集約対象のパケットの待ち方に対して分類する。

2.1.1 分類の基礎

図1のWSNの送受信モデルを用いて、集約方式について説明する。自ノードで発生した観測データを P_{src} 、他ノードから受け取った中継データを P_{relay} 、集約後に送信するパケットを P_{send} とする。まず、 P_{src} 、 P_{relay} のサイズと P_{send} のサイズから集約方式を分類できる。また、中継ノードで集約するためには、集約対象の複数のパケットが必要である。従って、パケットの待ち方によって集約方式を分類できる。以下に分類方法について述べる。

2.1.2 データ構造による分類

集約時のデータ構造としては、図2、図3の方式が考えられる。図2のようにデータ部を連結する方式を連結方式、図3のようにデータ部を結合する方式を結合方式と定義する。連結方式では、2つのパケットを連結することでヘッダ1つ分が削減される。ヘッダは送信先や制御情報が含まれ、それと比較してWSNで扱う情報は気温・湿度などで小さいといえる。よって、ヘッダを削減することは送信電力の削減に繋がり、消費電力の改善が見込まれる。また、パケット数の削減によりパケットの確認応答に関するオーバーヘッドが減り、スループットも向上する。この方式は802.11nにて同様の概念が採用されている。

一方、結合方式ではデータ集約を行うときにパケット2つに含まれるデータを1つに結合する。パケットに含まれるデータが気温・湿度などの数値データの場合、複数のデータから平均値などを求めることが例として考えられる。このように応用範囲は限られるが単純に連結するよりもビット数が少なくなるため、集約前後でパケット長が変化しないのは消費電力を重視するセンサネットワークにて効果的であるといえる。

また、連結方式と結合方式の中間として、可変方式が考えられる。これは、パケット2つに含まれるデータを1つに結合する際に、結合前のノード情報などが付加されるものである。結合方式に比べると情報量が多いため、省電力性と情報量の双方が必要なときは有効的である。

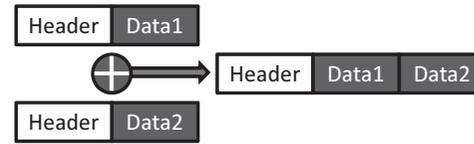


図2 連結方式 ($r = 1$)

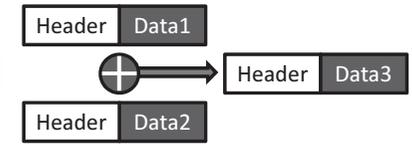


図3 結合方式 ($r = 0$)

2.1.3 集約対象のパケットの待ち方による分類

ここでは中継ノードでのパケットの待ち方について分類する。パケットの待ち方として、絶対待たない、必ず待つ、たまに待つ、の3通りが考えられる。絶対待たない方式を集約なし、必ず待つ方式を完全集約、たまに待つ方式を部分集約と定義する。

2.1.4 集約方式の分類

ここまで集約時のデータ構造、集約対象のパケットの待ち方について述べた。この考察から集約方法を分類したものを表1に示す。パケットの待ち方は待ち時間の上限 w による違いであり、パケット集約方式は集約率 r による違いである。集約率において、特に $r = 1$ のときを連結方式、 $r = 0$ のときを結合方式、 $0 < r < 1$ のときを部分集約と定義する。

表1 各方式の一覧

パケット集約方式 \ パケットの待ち方	集約なし ($w = 0$)	完全集約 ($w = \infty$)	部分集約 ($0 < w < \infty$)
連結方式 ($r = 1$)	A	B	E
結合方式 ($r = 0$)		C	
可変方式 ($0 < r < 1$)		D	

A. 集約なし

- データ集約を行わず、中継パケットを次ノードへ送信
- 利点：普及している技術であり、集約待ちにより遅延増加しない
- 欠点：パケットは発生した分だけ送信するため、省電力効果が小さい

B. 完全集約-連結方式

- 中継パケットと発生パケットに含まれるデータを集約して次ノードへ送信 ($r = 1$)
- 利点：集約した分だけヘッダ削減され、データの完全性が保持される
- 欠点：パケットサイズに対するヘッダサイズが小さければ、集約効果が小さい

C. 完全集約-結合方式

- 中継パケットと発生パケットに含まれるデータを集約して次ノードへ送信 ($r = 0$)
- 利点：集約前後のパケットサイズが変化しないため、省電力性に優れる
- 欠点：複数のデータを平均化などで単一化するため、データの完全性がなくなる

D. 完全集約-可変方式

- 中継パケットと発生パケットに含まれるデータを部分的に集約して次ノードへ送信 ($0 < r < 1$)
- 利点&欠点：連結方式と結合方式の利点を部分的に持つ

E. 部分集約-提案方式

- w 時間以内にパケット発生すれば中継パケットと集約して次ノードに送信
- w 時間以内にパケット発生しなければ中継パケットのみを集約して次ノードへ送信
- 利点：遅延を一定以内に抑えることができ、集約効果は r, w の 2 変数で調整可
- 欠点： w を設定することで集約機会が制限され、集約効果が悪化

ここでのデータの完全性とは、集約前の情報を全て保持していることである。また、部分集約の説明では提案方式に限定しており、詳細は後述する。

2.2 集約率と WSN モデル

中継ノードでデータ集約する場合には、集約対象のデータを削減できる。ここで削減される割合を r ($0 \leq r \leq 1$) とし、 r が 0 に近いほど集約効果が高いものとする。パケットはヘッダとデータから構成されており、 n 個のパケットを集約したときのパケットサイズ P_n は以下のように表される。

$$P_n = \text{Header} + (n \cdot r + 1) \cdot \text{Data} \quad (1)$$

次に、WSN の送受信モデルとして図 1 について考える。自ノードで発生した観測データを P_{src} 、他ノードから受け取った中継データを P_{relay} とすると、 n ホップ目のノードが送信するパケットサイズ P_{send} は以下のように表される。

$$\begin{aligned} P_{send} &= P_{relay} + P_{source} = P_n + P_{source} = P_{n+1} \\ &= \text{Header} + ((n+1)r + 1) \cdot \text{Data} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式より、集約後のパケットサイズは連結方式、部分集約では増加するが結合方式では変化しない。また、 n ホップまでのノードの送信パケットサイズの総和 P_{total} を求めると以下ようになる。

$$\begin{aligned} P_{total} &= \sum_{k=1}^n P_{n+1} = \sum_{k=1}^n (\text{Header} + ((k+1)r + 1) \cdot \text{Data}) \\ &= n \cdot \text{Header} + \left(\frac{1}{2}(n+1)(n+2)r + n\right) \cdot \text{Data} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式は、連結方式 ($r = 1$) では $n \cdot \text{Header} + (\frac{1}{2}(n+1)(n+2) + n) \cdot \text{Data}$ 、結合方式 ($r = 0$) では $n(\text{Header} + \text{Data})$ となる。部分集約 ($0 < r < 1$) では両者の中間となる。

3. 提案方式

無線センサネットワークは多数のセンサノードが利用されており、多くの中継ノードを介するほど良い集約効果が期待できる。よって、集約率による省電力性、遅延の観点から考察を行い、各方式の違いを示す。

3.1 提案アルゴリズム

データ集約を行うためには集約対象の複数のパケットが必要である。ノードでパケットが発生した場合、データ集約するために集約対象のパケットを待つ時間が必要である。本稿では、この時間を待ち時間 w と呼ぶ。待ち時間が長いと基地局にパケットが届く時間 (遅延) が長くなる。そこで、本提案では待ち時間に上限をつける方式を提案し、以後 FWT (Fixed Waiting Time) と呼ぶ。FWT 方式のフローチャートを図 4 に示す。

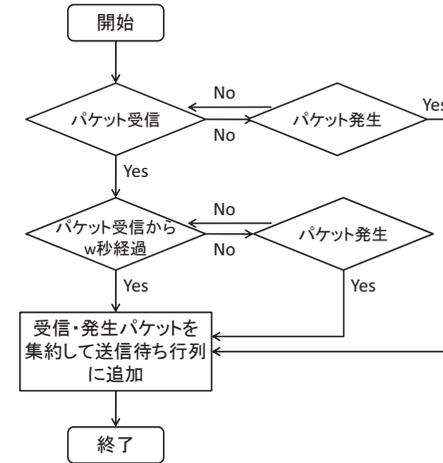


図 4 FWT アルゴリズム

これは部分集約の一種であり、待ち時間が大きいほど集約機会が多いため集約率が高く、省電力化がなされる。これに対し、待ち時間が小さいと遅延が短縮され、集約されずに送信されるパケットが多くなる。また、遅延とはパケット発生から到着までの時間を表しており、集約待ち時間が長いほど遅延が大きくなる。本提案の FWT では集約待ち時間に上限 w を設定することで、集約するパケット数は減少するが遅延を削減することができる。集約効果と遅延はトレードオフの関係なので、 w の最適値は両者の関係から求められる。

3.2 遅延時間の理論解析

ここではパケット発生から到着までの遅延について、各方式の理論値を示す。集約なしを NA 、完全集約を FA 、FWT 方式を FWT と表記し、変数については表 2 を用いる。

表 2 変数一覧

N	ノード数 (個)
w	データ集約待ち時間 (s)
d	各ノード間の伝送時間 (s)
p	パケット発生率 (packet/s)

$$NA_{delay} = N \cdot d \quad (4)$$

$$FA_{delay} = N \cdot d + (N - 1)/p \quad (5)$$

$$FWT_{delay} = \begin{cases} N \cdot d + (N - 1)w, & p \ll w \\ N \cdot d + (N - 1)/p, & p \gg w \end{cases} \quad (6)$$

(4) 式では遅延はパケットの送信時間であり、(5) 式では (4) 式に中継ノードでパケット発生するのを待つ時間が加わる。(6) 式では $p \ll w$ の場合、殆ど集約されずに各中継ノードで w 待機して送信されるため、遅延は [各ノードの伝送時間]+[各中継ノードでの集約待ち時間] $=N \cdot d + (N - 1)w$ となる。これに対し、 $p \gg w$ の場合、殆ど集約されて送信されるため、遅延は [各ノードの伝送時間]+[各中継ノードでのパケット発生待ち時間] $=N \cdot d + (N - 1)/p$ となる。

4. 評価

提案方式の有効性を示すためにシミュレーションを行う。

4.1 シミュレーション仮定

提案方式の有効性を示すために、シミュレーションにより評価を行う。シミュレーションでは無線ネットワークを想定するためキャリアセンスを用いる。キャリアセンスとは、無線ネットワーク上でパケットの衝突を防ぐ方法である。この説明のため、図 5 に示すトポロジを用いて説明する。B が C へデータ送信中のときを考えると、B は送信中、C は受信中しており、両ノードは同時に送受信ができない。また、A が B に送信しようとキャリアセンスをした場合には、B が送信中であることがわかるので A から B に送信しない。この結果、B の周囲の通信が抑制される。以上のような動作をするように、シミュレーションにて実装した。

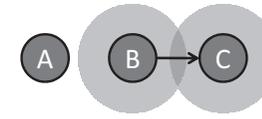


図 5 キャリアセンスによる通信抑制

評価トポロジは、ノードは円形、シンクは三角形で示し、パケット衝突による影響を調べるために様々なトポロジを用いて比較する。まず、評価トポロジとして、基地局でパケット衝突しない 4 ノードのトポロジ (図 6)、2 方向から基地局にパケット衝突する 4x2 ノードのトポロジ (図 7)、4 方向に増やした 4x4 トポロジ (図 8) を示す。

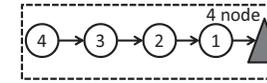


図 6 ノード数 4 のトポロジ

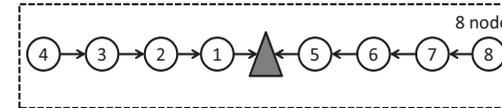


図 7 ノード数 4x2 のトポロジ

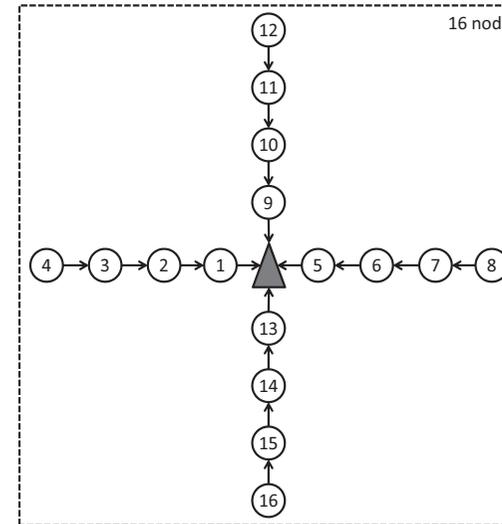


図 8 ノード数 4x4 のトポロジ

次に評価方式について説明する。まず、各ノードの特性の評価を行い、続いてノード数の増減による変化を調べるためトポロジ毎の評価をする。次に、集約方式毎の特性についての評価を行い、最後にパケットサイズを変化させて評価をする。シミュレーション仮定は表3に示す。

表3 シミュレーション仮定

パケットサイズ (Byte)	64
スループット (kB/s)	200
シミュレーション時間 (s)	100
ノード数	4, 8, 16
集約待ち時間 (s)	w

4.2 ノード毎の評価

ここでは、ノード数4(図6)で集約しないときの各ノードの送信パケット数、遅延について評価する。各ノードの特性を調べるため、スループットを超えるデータ量が発生してネットワークが飽和状態になるときを想定する。横軸に示す各ノードのパケット発生率はポアソン分布を用いており、縦軸にはシンクへの到着パケット数、シンクへの到着遅延を取って評価する。ノード毎の送信パケット数を図9、ノード毎の遅延を図10に示す。

図9ではパケット発生率が1000(packet/s)以下のときは、ノード2の送信パケット数が最も多い。この理由は、キャリアセンスを行うことで周囲の通信が抑制されるため、ノード4の送信パケット数が少ないときはノード2の送信処理が抑制されないためである。さらに、パケット発生率が1000(packet/s)以上でノード2の送信パケット数が減少している理由は、ノード1の送信先であるシンクは受信専用であるため、送受信を行うノードに比べて送信しやすい。このため、ノード1の送信数が増えてノード2の送信数が減少する。

図10ではノード1の遅延が全体的に小さい、この理由は、ノード1は中継せずにシンクへ直接送るためである。また、パケット発生率が500(packet/s)以上のときは、全ノードの遅延が大幅に増加している。この理由は、パケットの発生量が送信量より増えたため、シンクに到着しないパケットが生じるためである。このとき、シミュレーション時間が増えるほど遅延が増加する。

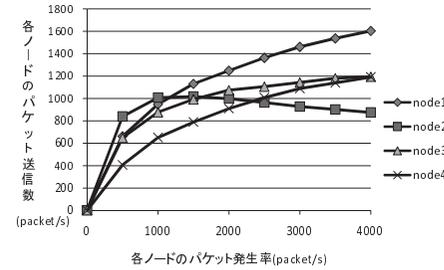


図9 ノード毎の送信パケット数(集約なし)

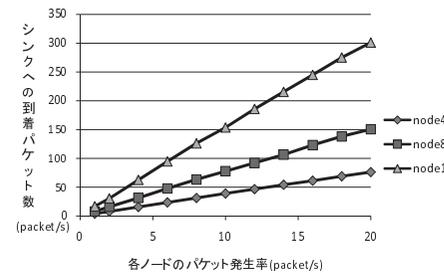


図11 トポロジ毎のシンクへのパケット到着数 ($r = 0$)

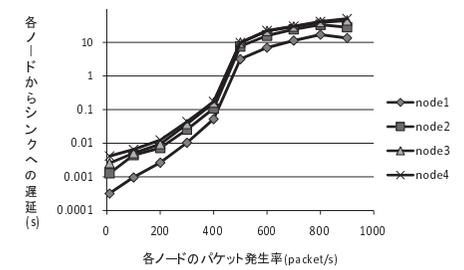


図10 ノード毎の遅延(集約なし)

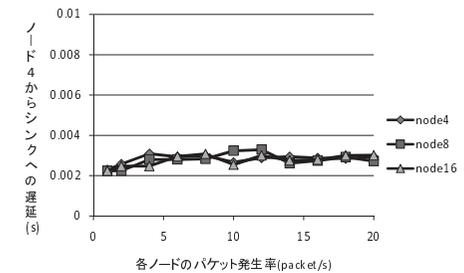


図12 トポロジ毎のシンクへの到達遅延 ($r = 0$)

4.3 トポロジ毎の評価

ここでは、ノード数4(図6)、ノード数4x2(図7)、ノード数4x4(図8)のトポロジ毎の評価を行う。トポロジ毎の違いを調べるため集約待ち時間は $w = x$ に固定して $r = 0$ の評価を示す。シンクへの到着パケット数を図11、ノード4からシンクへの到着遅延を図12に示す。図11は、ノード数が2倍に増えると到着パケット数も2倍になることがわかる。図12では、ノード数による有意差が見られない。よって、ノード数を増やすことでの差は、伝送データ量が増えることによる差しか現れない。

4.4 集約方式毎の評価

ここでは、ノード数4(図6)で集約方式毎に評価する。FWT方式でパケットが集約されるときは、集約待ちの間にパケットを受信したときである。つまり、 w がパケットの到達間隔より大きいとき集約される。パケットの到達間隔は1パケットの伝送時間であり、パケットサイズ/スループットで定義される。これを x とおいて、 $w = 0.1x, x, 10x, 100x, \infty$ について評価する。 $w = \infty$ は、待ち時間の上限を設けない“既存集約”である。さらに、集約率について $r = 0, 1$ の2通りを評価することで、 w, r に対しての集約効果を調べる。

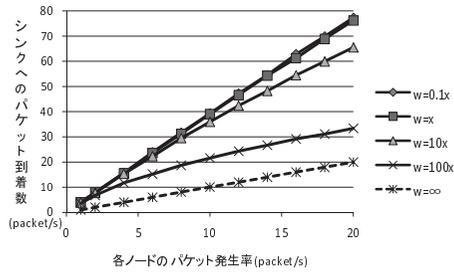


図 13 シンクへのパケット到着数 ($r = 0$)

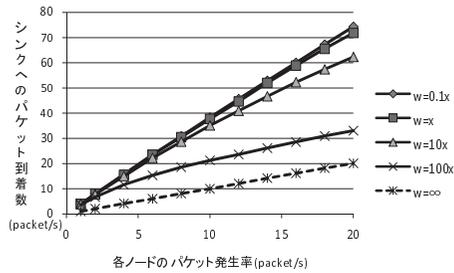


図 15 シンクへのパケット到着数 ($r = 1$)

まず、集約前後のパケットサイズを固定とした $r = 0$ について評価する。シンクへの到着パケット数を図 13、ノード 4 からシンクへの到着遅延を図 14 に示す。到着パケット数 (図 13) から考察すると、 $w \leq x$ ではグラフが重なっているが、 $w > x$ では w が大きいほどパケット数が減少していることがわかる。さらに到着遅延 (図 14) の結果から考察すると、図 13 と同様に $w \leq x$ ではグラフが重なっているが、 $w > x$ では w が大きいほど遅延が増大している。また、遅延はパケット発生率が増大するほど w による差が小さくなるのに対し、シンクへの到着パケット数はパケット発生率が増大するほど w による差が大きくなる。これは、パケット発生率が増えることでパケット到着間隔が短くなり、集約待ち時間中にパケットが到着する確率が高くなるためである。つまり、パケット発生率が大きいときは、 w が大きくても遅延の増加幅が小さく、集約効果は大きいといえる。

次に、集約後のパケットサイズが増大する $r = 1$ について評価する。横軸と縦軸は先ほどの評価と同様である。まず、図 15 ではシンクへの到着パケット数を示しており、図 13 よりも減少している。これは、パケットサイズが増えたことで送信機会が減少したためである。また、図 16 はノード 4 からシンクへの到着遅延を示しており、図 14 よりも増加して

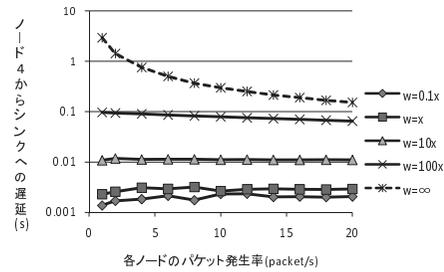


図 14 シンクへの到達遅延 ($r = 0$)

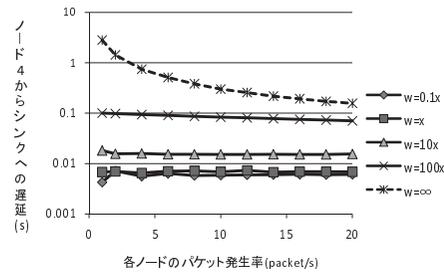


図 16 シンクへの到達遅延 ($r = 1$)

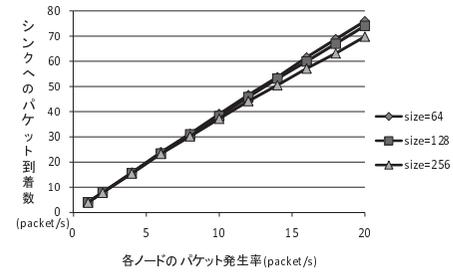


図 17 パケットサイズ毎のシンクへのパケット到着数 ($r = 0$)

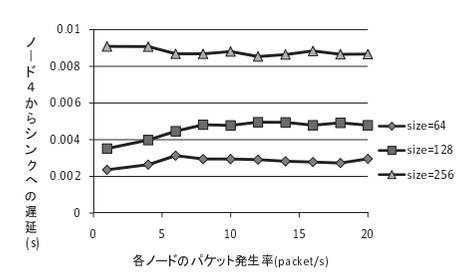


図 18 パケットサイズ毎のシンクへの到達遅延 ($r = 0$)

いる。これは、パケットサイズが増えたことで 1 パケットの伝送時間が増えたためである。よって、集約率 r によらず先程と同様の結論がいえる。さらに、既存集約の $w = \infty$ では、各ノードでパケット発生するまで待つので集約効果は最も高く、遅延は各ノードで集約対象のパケットが発生するまで必ず待つため、パケット発生率が小さいほど遅延は増大する。

4.5 パケットサイズ毎の評価

ここでは、パケットサイズ 64 Byte を基準として、128 Byte、256 Byte に増やした場合の評価を比較する。パケットサイズ毎の違いを調べるため集約待ち時間は $w = x$ に固定して $r = 0$ の評価を示す。シンクへの到着パケット数を図 17、ノード 4 からシンクへの到着遅延を図 18 に示す。パケット到着数 (図 17) は、パケットサイズが増えると到着数が減少していることがわかる。また、到着遅延 (図 18) は、パケットサイズが増えると遅延が増大している。この 2 つの要因は、1 パケットの伝送時間が増えるためである。

4.6 考 察

FWT の評価から分かったことをまとめると、 w が大きいほど集約されやすいためシンクへの到着パケット数が減少し、その分だけ遅延が増大する。また、 r が大きいほど集約後のパケットサイズが大きいため到着パケット数が微減し、伝送量が多くなると送信時間が増大するため、その分だけ遅延が増大する。続いて、トポロジの変化によりノード数が増えると、それだけ発生するパケット数も増えるため、シンクへの到着パケット数も増大するが、遅延は変化しない。さらに、パケットサイズが増加するほど到着パケット数が微増し、1 パケットの伝送時間が増大するためその分だけ遅延が増大する。

これらの考察により、集約率 r に関係なく w が大きい方が集約効果が高く省電力効果が期待できる。また、ノード数が増えることによりシンクに到着するパケット数は比例して増えて遅延は変化しないことから、中継ノード数を増やさない限りは各ノードのバッテリー残量

に影響しないといえる。さらに、パケットサイズが増えることで1パケットあたりの伝送時間は増えるため遅延は増大するが、シンクに到着するパケット数は変化しないとわかる。よって、データ集約により集約効果を期待するには、 w を大きくすることで相応の遅延を許容する必要があり、パケット発生率が大きいときは w による遅延の差が小さくなることから、仮にパケット発生率がわかっていれば、パケット発生率が小さいときは w を小さく、その逆のときは w を大きくすることで、どのようなパケット発生率でも遅延を抑えながら集約率を高めることが可能である。

5. WSN のアプリケーション

ここでは、WSN のアプリケーションについて検討する。アプリケーションによってイベントの観測頻度が異なり、これで分類したものを図 19 に示す。データ集約を用いるためには、集約対象のパケットを待つ必要があり、遅延の増加に繋がる。一般的に、イベント発生頻度が高いということは、情報の連続性を重視するためであり、遅延が増加するデータ集約は適さないといえる。よって、データ集約が適するアプリケーションとは、イベント発生頻度が低く、ある程度の遅延が許容される用途である。つまり、イベント発生頻度が数分以上の間隔であるときに、データ集約の有用性があるといえる。

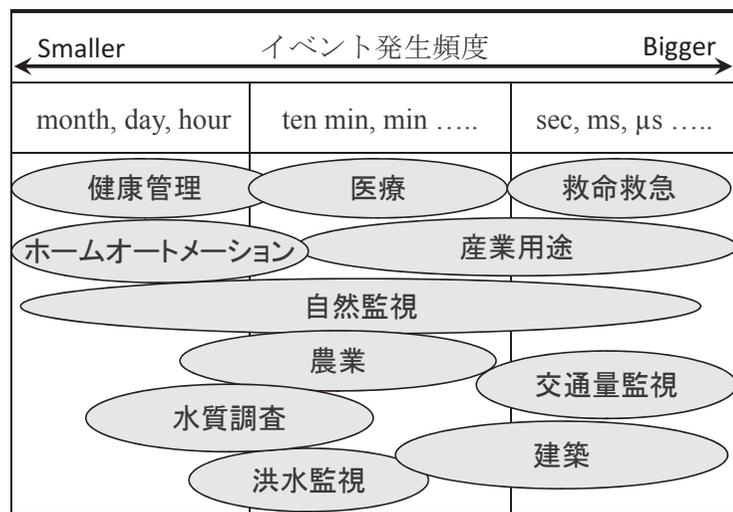


図 19 WSN のアプリケーション

6. まとめ

本稿では、データ集約における遅延増加に対する解決策として、集約待ち時間に上限をつける方式 FWT を提案した。遅延と集約効果の評価のためにシミュレーションを用いて、待ち時間毎、トポロジ毎、パケットサイズ毎に評価を行い、遅延はパケット発生率と待ち時間において密接に関係していることが示された。その結果、遅延が増大するのはパケット発生率が小さく、待ち時間が大きいときであることがわかり、待ち時間の基準としてパケット発生率の逆数を用いることで、遅延が大幅に増加しないように制御できることが示された。今後の課題として、中継ノード数を減らすために Tree 構造の n 分木のトポロジの評価を行い、さらなる省電力化の指針を立てることや、実用上での遅延を考察する必要がある。

謝 辞

本研究は科研費基盤研究 A (20240005) の助成を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) Shen,C., Srisathapornphat,C. and Jaikao,C.:Sensor Information Networking Architecture and Applications, IEEE Pers. Commun, pp. 52-59(2001).
- 2) Heinzelman,W. R., Chandrakasan,A. and Balakrishnan,H.:Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, in Proc. of the Hawaii Int'l Conf. on System Sciences, pp. 1-10(2000).
- 3) Younis,O. and Fahmy,S.:Distributed clustering in adhoc sensor networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach," Proc. of IEEE INFOCOM pp. 629-640(2004).
- 4) Lindsey,S., Raghavendra,C.s:Pegasis: Power-efficient gathering in sensor information systems, Proc. IEEE Aerospace Conference, vol. 3, pp. 1125-1130(2002).
- 5) Akkaya,K. and Younis,M.:A Survey on routing protocols for wireless sensor networks, ELSEVIER Ad Hoc Networks, vol.3, pp. 325-349(2005).
- 6) 渡辺 尚:センサーネットワークプロトコルの基礎技術, 電気関係学会東海支部連合大会 (2006).
- 7) 森 崇彰, 高 博昭, 上原 秀幸, 大平 孝:Chain 型センサネットワークにおける集約率とルート分割による消費電力削減について, 電子情報通信学会, USN2010-35, pp.91-96(2010).
- 8) Solis,I. and Obraczka,K.:In-Network Aggregation Trade-offs for Data Collection in Wireless Sensor Networks, University of California Santa Cruz Technical Report(2004).
- 9) Rajagopalan,R. and Varshney,P.:Data-Aggregation Techniques in Sensor Networks: A Survey, IEEE Comm. Surveys and Tutorials, pp. 48-63(2006).