

異種無線による電力効率化のための ノードのグループ構成手法のシミュレーション

戸澤 涼¹ 稲村 浩² 中村 嘉隆²

概要 : IoT センサデバイスは、バッテリー駆動が前提となるため省電力化が重要である。LoRaWAN は、無線センサネットワーク（WSN:Wireless Sensor Network）において省電力で広域カバレッジを実現している。LoRaWAN には、WSN 内のデバイス増加時にメッセージ衝突によるパケット到達率低下というスケラビリティでの課題がある。本研究では、WSN 内で複数ノードのグループを自律的に構成し代表がデータを集約し代理送信する手法を基本に遠距離、近距離において異種通信を使い分けることで、WSN の電力効率化を図る。先行研究として、異種無線を組み合わせた場合と既存の LoRa のみの WSN における消費電力の差異を実測にて検証し、提案したプロトコルを用いた際のデータの集約による消費電力の効率化に関する消費電力のモデル式を実測データで評価により提案手法の有効性を提示した。本稿では、提案手法の有効性を評価するために応用として、実環境においてゴミ収集の IoT 化を推進した場合、提案手法を用いた場合の方が LoRaWAN のみの既存ソリューションと比較し、消費電力の観点で有効であるかをネットワークシミュレーターの ns3 を用いて評価する。

Simulation of Node Group Construction Method for Energy Efficiency

RYO TOZAWA¹ HIROSHI INAMURA² YOSHITAKA NAKAMURA²

1. はじめに

WSN（WSN: Wireless Sensor Network）は、IoT におけるセンサネットワーク技術である。IoT の利用用途は、環境モニタリング、ビル管理、スマートホーム等が挙げられる。IoT の代表例となるセンサデバイスは、バッテリー駆動の制約によるデバイスの省電力化及び遠隔におけるノード管理の必要性、低伝送量、ノード数の増加によるネットワークの混雑等が課題となっている。これらの課題に対し、WSN において省電力で広域カバレッジを特徴とする省電力広域通信規格の一つである LoRaWAN が選択肢として注目されている。LoRaWAN とは、LoRa という長距離通信を特徴とした省電力広域ネットワークプロトコルである。スター型のトポロジや免許不要の周波帯を利用しているためネットワーク構築が低コストで可能であることが可能である。しかし、LoRaWAN の課題として、ネットワーク内のデバイス数が増加した際にパケット到達率が低下すると

いう課題がある。以上の背景から、LoRaWAN について、スケラビリティを考慮した高集積なセンサネットワークの研究が行われている。既存手法では、WSN 内で幾つかのセンサからなるグループを作成しグループの代表がセンサ情報を集約し代理送信することで、ネットワークの収容数向上と消費電力量削減の可能性を提示した。しかし、グループ構成手法を用いるには、センサ間の直接通信が必要になる。LoRaWAN のみでは仕様上実現が困難である上に、グループの生成や維持などにおける具体化が求められる。そこで我々は先行研究として、消費電力（削減・平準化）の観点で、市販されている LoRaWAN と BLE が搭載されたモジュールに着目し、遠距離通信は LoRaWAN、近距離通信は BLE を用いることで異種通信の消費電力を考慮したグループ構成手法を提案し、電力実測実験のもと有効性を提示した。

本稿では、提案手法の有効性を評価するために応用として、実環境においてゴミ収集の IoT 化を推進した場合、提案手法を用いた場合の方が LoRaWAN のみの既存ソリューションと比較し、消費電力の観点で有効であることをネット

¹ 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

² 公立はこだて未来大学 システム情報科学部

ワークシミュレーターの ns3 を用いて評価する。

2. 関連研究

2.1 LoRaWAN におけるネットワーク効率化のためのノードのグループ化構成法と通信制御方式

LoRaWAN にはノード数のスケーラビリティ、及び拡散率による通信時間が大きく異なるという課題がある。手柴らが提案する手法 [4] は、消費電力量を抑制しセンサノードのバッテリー寿命を延伸するため、GW とセンサノードの距離、ノード数、消費電力量をもとにノードのグループを作成し、GC (GC: Group Coordinator) と呼ぶセンサノードを経由して通信する。想定環境は、ノードが均一に分布されたネットワークであり、センサノードが持つ通信モジュールはスケジュールされた時刻に下り受信が可能な LoRaWAN のクラス B である。アプローチを下記に示す。センサノードはネットワークに参加後、指定されたグループ内の GC を経由しデータを送信する。通信時間による消費電力量効率化のため、拡散率とそれに伴う通信時間をもとに、同一周波数を異なる時間のスロットへ分割する。グループの構成により、センサノード全てが GW と接続する既存モデルと比較し合計送信時間が削減される可能性がある。拡散率を考慮した時間スロットの割当により、同一周波数を一定時間で分割する時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) により時間スロットの効率的な割当が可能となると述べている。

課題として、グループ化にはセンサノード間での通信が必要となるが、LoRaWAN の仕様上、実現が困難である点、グループ編成時にネットワークサーバにセンサノードの物理的位置を手動で登録しなければならない点つまり動的なノードの変化への対応が困難であることや GC に LoRaWAN の利用が集中することによる消費電力増加が考慮されていない点等があげられる。そこで本研究では、グループ化手法を活かし異種無線を用いた消費電力効率化、及びノードの情報を用いて自律的にグルーピングを行う。

2.2 LPWA 通信を利用する IoT プラットフォーム向けの電力効率を考慮したゲートウェイ配置手法の検討

辻丸らが提案する手法 [3] は、センサノードの消費電力を平準化するため、LoRaWAN におけるゲートウェイの配置を最適化するものである。LoRaWAN のようなスター型トポロジの無線ネットワーク構成であると、ノード間の通信距離と消費エネルギーの差異を考慮する必要がある。本研究では、LoRaWAN における拡散係数を考慮することで通信距離と消費エネルギーのトレードオフを考慮しゲートウェイを複数配置し輻輳を減少させ消費電力を削減している。

課題として、拡散率をエネルギー消費のみでノードに割

り当てているため、同様の拡散率が割り当てられたセンサノードが密集した場合の衝突可能性が考慮されていない点、ゲートウェイの同時接続数の上限が考慮されていないため、通信の衝突可能性が考慮されていない点が挙げられる。本システムでは既存の LoRaWAN が提供する機能を用いて解決する。

3. 提案方式

提案方式では、LoRaWAN ネットワークにおいて電力効率化のためのグループ化方式の実現を目的とする。ここで、電力効率化とはノードの消費電力削減及び各ノードの消費電力量が均一となる平準化を含む。

3.1 グループ化

異種無線によるグループ化の具体的な手法とプロトコルを示す。

3.1.1 センサノード間通信

LoRaWAN の長距離伝送の回数を減らし、センサネットワーク全体の消費電力削減するため、異種無線 (LoRaWAN, BLE) (図 1 参照) を適用する。集約ノード (GL: Group Leader) は、グループ内は BLE, ゲートウェイとは LoRaWAN を用いてデータの送受信を行う。通常ノード (GM: Group Member) は、BLE にてデータの送受信を行う。

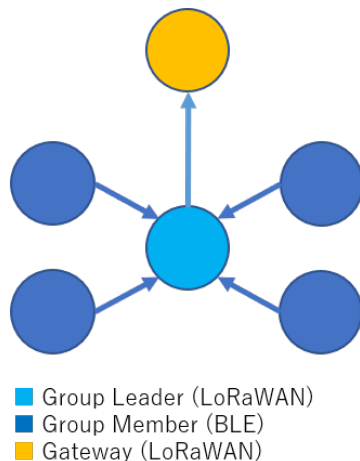


図 1 グループ化のトポロジ

3.1.2 グループ構成法

既存手法 [4] ではグループを作成する際に、全てのセンサノードの位置を事前に LoRaWAN の NS が把握していることが前提条件となっている。ネットワーク運用者の管理コストを削減するため、センサ起動時に周囲のセンサノード情報を取得し NS に提供することで、センサノード増減に合わせ能動的にグループを構成する。

センサ起動からグループを作成するまでのプロトコルを説明する。センサは起動時に、データ収集時間 (T_{da} : Data

実環境として、愛知県東浦町が発行しているゴミステー

ションマップ（図3参照）から位置座標及びゴミ系統（燃えるゴミ・燃えないゴミ・資源ごみ）を取得し、ゴミステーションの座標をセンサの位置情報とする。各ゴミ系統に対しセンサを取り付けると仮定し、ゴミステーション毎にグループを構築する。以降、各ゴミ系統に対してセンサ取り付けたものをスマートゴミ箱と称する。文献[9]を参考に、スマートゴミ箱の仕様を表1参照に示す。スマートゴミ箱の状態を超音波センサを用い3種類で把握する。

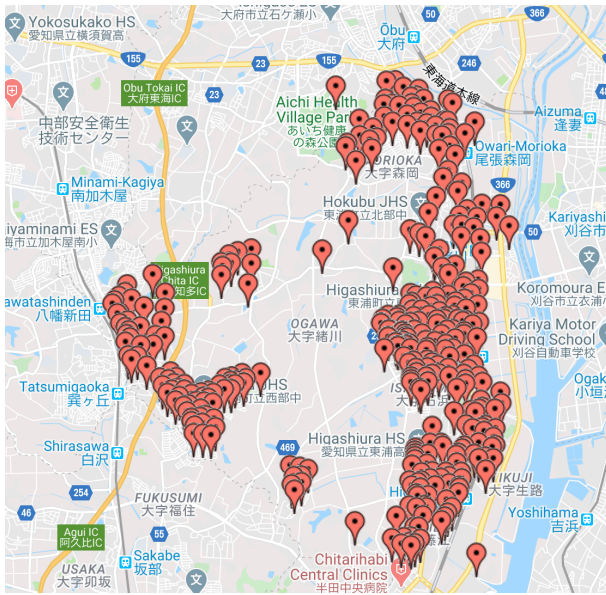


図3 愛知県東浦町ゴミステーションマップ

表1 スマートゴミ箱の仕様

Parameter	Value
status	Empty, Filled, Full
sensor	Ultrasonic sensor
wireless	LoRaWAN, BLE

4.2 シミュレーションシナリオ

実験の目的を達成するため以下のシミュレーションシナリオを用意した。性能評価のため、従来方式（LoRaWAN単独）と単純グループ化、平準化つきグループ化と3つのケースを試行した。ノードは、文献[10]より抽出した表2に則り10分間に1度ゴミ箱の残容量をネットワークサーバへ送信する。表3にシミュレーションに用いたパラメータを示す。ネットワークサーバ側で、センサデバイスとセンサデータを紐づけるため、GLのペイロードは、BLEのネットワークアドレスとセンサデータを、集約するノード分送信する。

表2 LoRaWAN のユースケース

ケース	GW 接続デバイス (台)	ゲートウェイ (台)	通信頻度
電灯監視	200	1	1 分毎
ゴミ箱	2000	4	10 分毎
GPSトラック	3000	5	15 分毎
水道メーター	30000	10	30 分毎
パーキングメーター	60000	15	1 時間毎

表3 グループ化におけるパラメータ

Parameter	Value
number of gateways	1
number of nodes	32
activation time	0s
connection interval	10m
ble address (short)	4byte
lorawan payload	11 ~ 242byte
group leader payload	8byte * number of nodes
group member payload	4byte
LoRaWAN ADR	True
simulation time	1h

4.3 消費エネルギーの計測

消費電力量に関して、正確なエネルギーを導出することは困難であるため、消費電流量の計測をもって評価する。LoRaWANは、NS3モジュール（文献[8]参照）が提供する電力モデルを用いる。BLEは、文献[11]を参考にRx(0.003A)、Tx(0.003A)とする。

4.3.1 GW・ノードの配置

LoRaWANのGWの通信可能距離は、都市部や郊外では5km程度と言われている。図3をもとに、全てのスマートゴミ箱に対しカバレッジを確保できるようにGWを図4のように配置した。シミュレーターに用いたGWの座標は表4に示す。

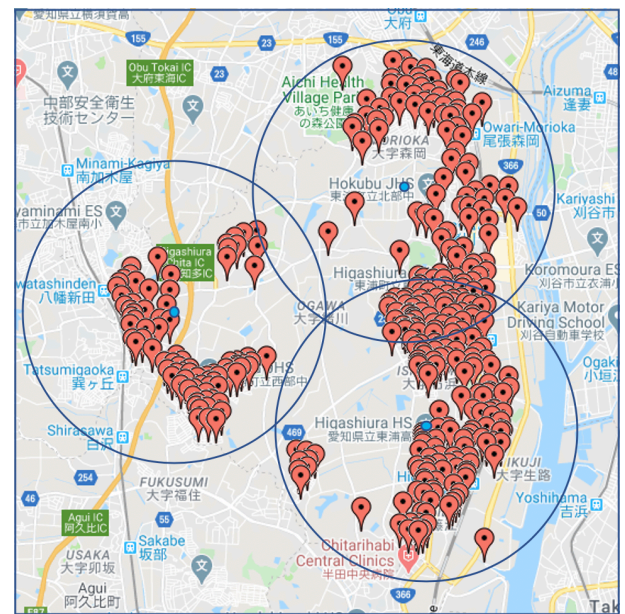


図4 カバレッジを考慮したGWの配置

表 4 ゲートウェイの配置場所詳細

名前	座標
東浦町卯ノ里小	(34.969392, 136.924615)
愛知県立東浦高	(34.953981, 136.962864)
東浦町立北部中学校	(34.973183, 136.967018)

5. 結果と考察

従来方式 (LoRaWAN 単独), 単純グループ化, 平準化つきグループ化について, ノード毎の消費電流量をまとめた. シミュレーターの都合上, 町内全てのノードでの再現が難しかったため地域を限定し行った. 対象地域では, 全てのグループが 3 ノードで構成されている. LoRaWAN ノードに割り当てるデータレートを ADR にて自動で調節し全てのケースで DR5 を選択したまた, 消費電流量の値を元にバッテリー交換機会についての言及も行う. バッテリーの参考値として, 屋外での LoRaWAN モジュール [15] に搭載されている充電式バッテリー (4100mAh) を用いる. シミュレーターでの実測値と実際の製品のスペックとの間に差があったため, 前者に合わせ BLE の負荷電流を調整しシミュレーションを行った. 計測した各通信方式の 1 送信あたりの消費電流量を表??に示す.

表 5 1 送信あたりの消費電流量 (グループは 3 ノードの場合)

Parameter	Value
LoRaWAN	8mA
GL (単純グループ化)	13.4mA
GM (単純グループ化)	0.6mA
GL (平準化つきグループ化)	14.4mA
GM (平準化つきグループ化)	1.2mA

5.1 従来方式 (LoRaWAN 単独)

1 時間あたりの従来方式 (LoRaWAN 単独) の消費電流量を図 5 に示す. その他取得した値を表 6 に示す. いずれのノードも消費電流量は均一で, 差分は 0.001A ($\cong 1\text{mA}$) と LoRaWAN1 送信分にも満たない小さい値であった. ノード間で差が起きた理由としては, 図 6 より, スマートゴミ箱が設置されている箇所により GW との距離に差があるためである. バッテリー交換機会に関して, 表 5 の値を用いてバッテリーの持ち時間を計算すると, 10 分に 1 度の送信というユースケースで約 21 日間利用可能である. ノードのバッテリー残量が均一に減少するため, スマートゴミ箱のグループ単位で交換作業を同時に行うことが可能である.

5.2 単純グループ化

1 時間あたりのグループ化の消費電流量を図 7 に示す. 1 時間毎の消費電流量を図 8 に示す. その他取得した値を表 8 に示す. 棒グラフの配色について, 黒は設置されてい

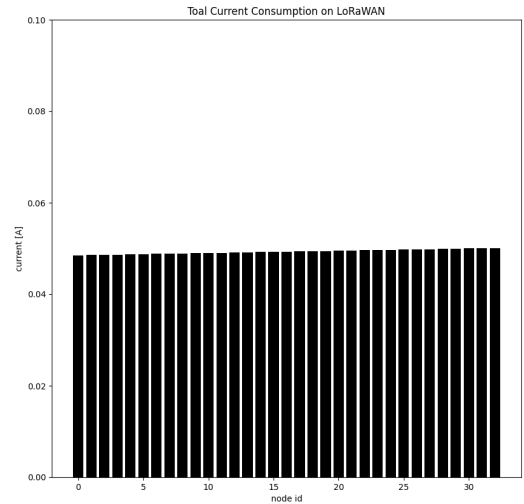


図 5 従来方式 (LoRaWAN 単独) の消費電流量

表 6 従来方式 (LoRaWAN 単独) の結果

Parameter	Value
ネットワーク全体の消費電流量	1.627A
パケット到達率 (LoRaWaN)	100%
ノード間の消費電流量における差分最大値	0.001A

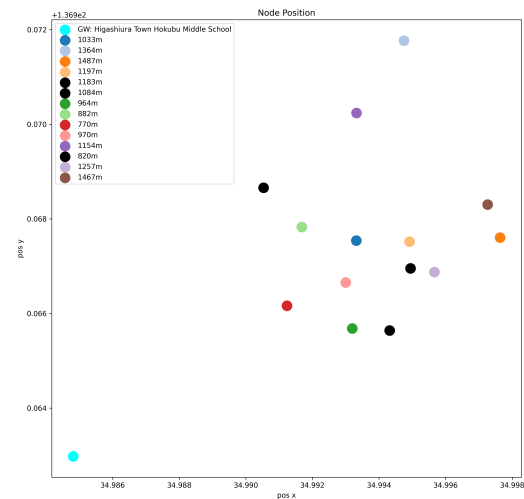


図 6 GW と各ノードの距離関係

るスマートゴミ箱が単体であるため, 構築できるグループが存在しないという理由から LoRaWAN のみを用いて通信するノード, その他は参加するグループ毎に割り当てられている. 図 7 を見ると, GL ノードに消費電流量が偏っている. 表 5 より, 従来方式 (LoRaWAN 単独) と比較し GL ノードの消費電流量に差が生じたのは, GM ノードのセンサデータを集約した分, 送信データ量が増加したことによる割り当てられる通信時間の増加であると考えられ

る。表 8 より、パケット到達率はいずれの通信方式においても 100 % を示した。バッテリー交換機会に関して、表 5 の値を用いてバッテリーの持ち時間を計算すると、前述したユースケースで、GL ノードが約 13 日、GM ノードが約 285 日間利用可能である。

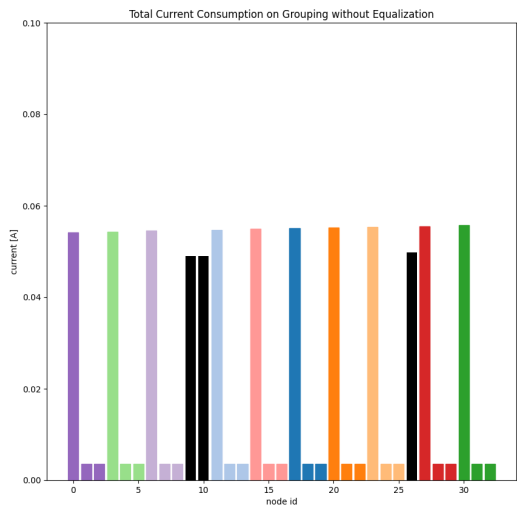


図 7 単純グループ化の消費電流量（LoRaWAN 単独比較用）

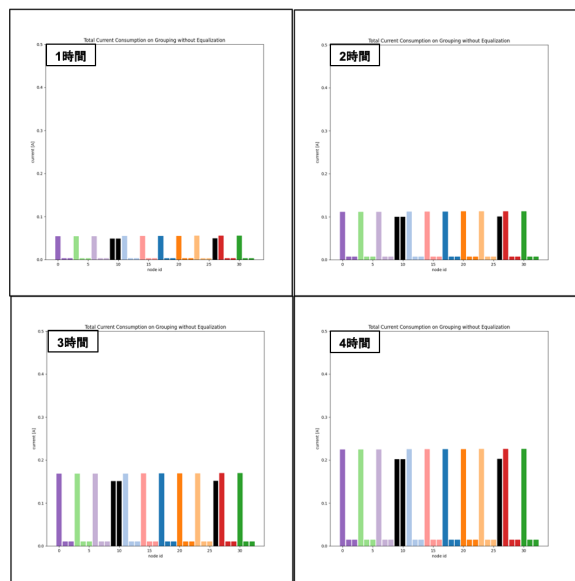


図 8 単純グループ化の消費電流量

表 7 単純グループ化の消費電流量まとめ

時間	ネットワーク全体の消費電流量	ノード間の消費電流量における差分最大値
1 時間	0.769A	0.052A
2 時間	1.565A	0.106A
3 時間	2.356A	0.158A
4 時間	3.147A	0.212A

表 8 単純グループ化のパケット到達率

時間	パケット到達率 (LoRaWaN)	パケット到達率 (BLE)
1 時間	100 %	100 %
2 時間	100 %	100 %
3 時間	100 %	100 %
4 時間	100 %	100 %

5.3 平準化つきグループ化

GL ノードの交換頻度が毎回であるケースの 1 時間毎の消費電流量を、図 9 に示す。表??を元に、前述した単純グループ化と比較すると、ノード間の消費電流量の差分が、0.052A から 0.026A と半分に削減された。これは、GL ノードが送信するごとに次の GL ノードを選出し切り替えを行ったためである。図??、表 5 を見ると、従来方式（LoRaWAN 単独）と比較し、平準化つきグループ化ではデータを集約すること、GL ノード通知のため BLE による通信回数が増えることの 2 つの理由から、バッテリー交換のタイミングを合わせようとする消費電流量が増加する傾向にある。

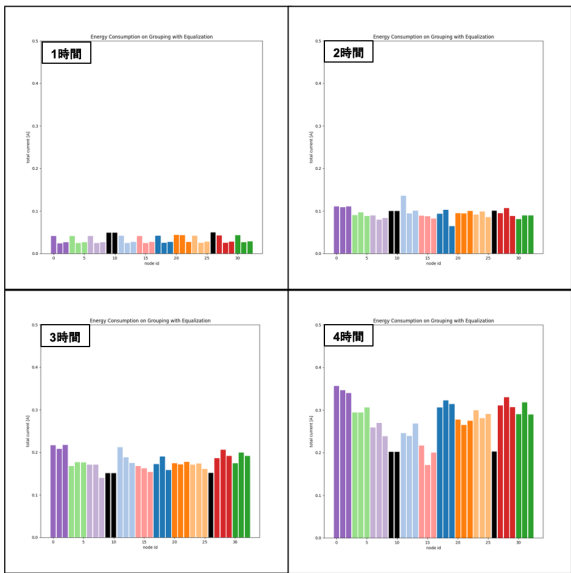


図 9 平準化つきグループ化の消費電流量（交替頻度:毎回）

表 9 平準化つきグループ化の消費電流量まとめ（交替頻度:毎回）

時間	ネットワーク全体の消費電流量	ノード間の消費電流量における差分最大値
1 時間	1.105A	0.026A
2 時間	3.121A	0.072A
3 時間	5.852A	0.077A
4 時間	9.126A	0.185A

5.3.1 GL ノードの交換タイミングによる比較

グループ内での通信回数を減らし、消費電力を削減するため GL ノードの交替頻度を変更しシミュレーションを実行した。グループ内の集約回数が 2 回で GL ノードを更新する場合の結果を、図 10、表 11、表 12 に示す。グループ

表 10 平準化つきグループ化の packets 到達率 (交替頻度:毎回)

時間	パケット到達率 (LoRaWaN)	パケット到達率 (BLE)
1 時間	100 %	86 %
2 時間	99 %	82 %
3 時間	96 %	78 %
4 時間	96 %	73 %

内の集約回数が 3 回で GL ノードを更新する場合の結果を、図 11、表 13、表 14 に示す。図 10、図 11 を見ると、交換頻度が低くなるほど LoRaWAN 単独でのノードとの消費電流量差が小さくなっている。交換頻度が 3 回に 1 回になった際に、グループを構築しているノード方が消費電流量を下回り始めた。これは、表 8 より、GL ノード切り替えを行わない方式の場合は packets 到達率が 100 % であること、表 10、表 12、表 14 より、原因として GL ノードのダウンリンクが増えたことから BLE での packets 到達率が減少し、GL ノードの切り替えが上手くいっていない事が考えられる。また、GL ノードの交換頻度の間隔が長くなり、時間が経過するとともに packets 到達率が減少していることから、通信タイミングの制御を考慮する必要がある。

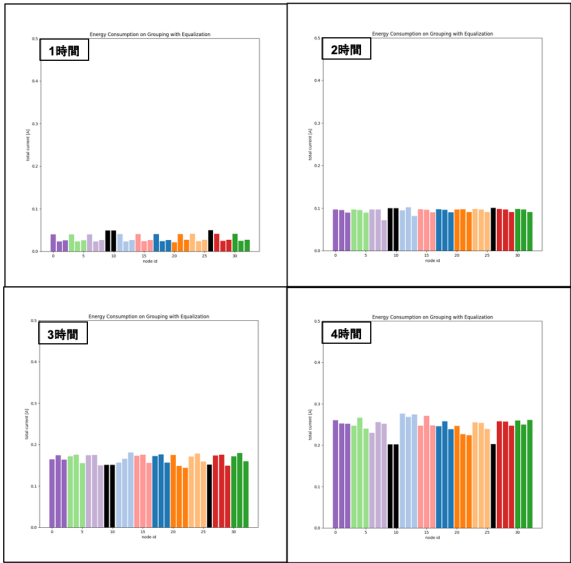


図 10 平準化つきグループ化の消費電流量まとめ (交替頻度:送信 2 回に 1 回)

表 11 平準化つきグループ化の消費電流量まとめ (交替頻度:送信 2 回に 1 回)

時間	ネットワーク全体の消費電流量	ノード間の消費電流量における差分最大値
1 時間	1.052A	0.029A
2 時間	3.116A	0.030A
3 時間	5.452A	0.037A
4 時間	8.163A	0.074A

表 12 平準化つきグループ化の packets 到達率 (交替頻度:送信 2 回に 1 回)

時間	パケット到達率 (LoRaWaN)	パケット到達率 (BLE)
1 時間	100%	80 %
2 時間	99 %	86 %
3 時間	96 %	80 %
4 時間	92 %	75 %

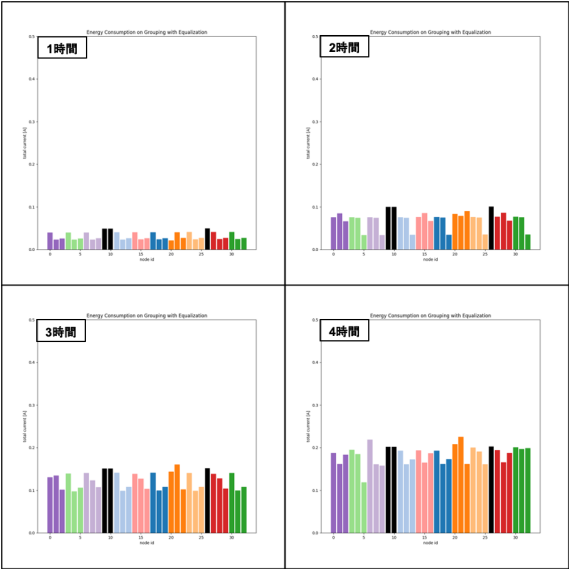


図 11 平準化つきグループ化の消費電流量 (交替頻度:送信 3 回に 1 回)

表 13 平準化つきグループ化の消費電流量まとめ (交替頻度:送信 3 回に 1 回)

時間	ネットワーク全体の消費電流量	ノード間の消費電流量における差分最大値
1 時間	1.052A	0.029A
2 時間	2.347A	0.067A
3 時間	4.07A	0.063A
4 時間	6.061A	0.107A

表 14 平準化つきグループ化の packets 到達率 (交替頻度:送信 3 回に 1 回)

時間	パケット到達率 (LoRaWaN)	パケット到達率 (BLE)
1 時間	100 %	80 %
2 時間	99 %	71 %
3 時間	99 %	69 %
4 時間	93 %	71 %

6. おわりに

WSN では、電池駆動型の IoT センサでは省電力化の議論がされている。WSN の中でも、LoRaWAN という長距離通信、低消費電力を特徴とする通信規格では都市部や市街地のような密集地において、ノードの台数が増加した際に、通信の衝突から再送が発生し結果としてバッテリー寿命が短命化するという課題がある。そこで我々は、WSN の消費電力効率化 (消費電力削減・消費電力平準化) のための BLE、LoRa を組み合わせた異種無線によるノードの

グループ化の実現を本研究の目的においた。目的の実現のために、既存の通信規格のプロトコルを変更せず異種無線の消費電力効率化が実現可能なシステムを設計した。提案したシステムは、ノードが収集可能な情報からのグループ構築機能、各ノードの通信における、Rx, Tx の理論値及び通信利用回数等からバッテリー残量を算出し、GL の切り替えを行う電力平準化機能を実装することで、WSN のオペレーターは、既存の通信方式と同様の利用で、バッテリー寿命を延伸することが実現可能となる。

その有効性を確認するため、提案システムをごみ収集のスマート IoT 化を話題とし、実世界を再現しシミュレーションを行った。

平準化つきグループ化において、パケット到達率向上のため GL ノードのダウンリンクのタイミングを調整するという課題が挙げられる。今後はグループ内で BLE の通信が衝突しない手法を検討する予定である。

参考文献

- [1] 戸澤涼, 稲村浩, 中村嘉隆: 高集積センサネットワークにおける異種無線を用いた電力効率化の研究, 情報処理, Vol.82, No.3, pp.97-98 (2020)
- [2] オープンデータ ごみステーション—東浦町 (最終閲覧日: 2020 年 3 月 10 日), <https://www.town.aichi-higashiura.lg.jp/soshiki/kohojoho/kohotokei/gyomu/opendata/1514185444468.html>
- [3] 辻丸勇樹, 坂本龍一, 近藤正章, 中村宏: LPWA 通信を利用する IoT プラットフォーム向けの電力効率を考慮したゲートウェイ配置手法の検討, 情報処理学会研究報告会, Vol.32, No.1, pp.46-53 (2017)
- [4] 手柴瑞基, 湯素華, 小花貞夫: LoRaWAN におけるネットワーク効率化のためのノードのグループ構成法と通信制御方式, 情報処理学会研究報告会, Vol.89, No.13, pp.1-8 (2018)
- [5] Dambal, Vageesh and Mohadikar, Sameer and Kumbhar, Abhaykumar and Guvenc, Ismail: Improving LoRa Signal Coverage in Urban and Sub-Urban Environments with UAVs, arXiv, 1902.11243 (2019)
- [6] Wu, He and Nabar, Sidharth and Poovendran, Radha: An Energy Framework for the Network Simulator 3 (ns-3), SIMUTools 2011 - 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques,
- [7] LoRaWAN Range Part 2: Range and Coverage of LoRaWAN in Practice (Updated) (最終閲覧日: 2020 年 4 月 6 日), <https://smartmakers.io/en/lorawan-range-part-2-range-and-coverage-of-lorawan-in-practice>
- [8] signetlabdei/lorawan: <https://github.com/signetlabdei/lorawan>
- [9] Joni, Koko and Haryanto, Haryanto and Rohim, D: Smart Garbage Based on Internet of Things (IoT), Journal of Physics: Conference Series, Vol.953, pp.012189
- [10] 1 台の LoRa ゲートウェイでどれだけのデバイスに対応できますか? (最終閲覧日: 2020 年 4 月 30 日), <https://soracom.zendesk.com/hc/ja/articles/115001237211-%EF%BC%91%E5%8F%B0%E3%81%AELoRa%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%83%88%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%82%A4%E3%81%A7%E3%81%A9%E3%82%8C%E3%81%8F%E3%82%89%E3%81%84%E3%81%AE%E3%83%87%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%81%AB%E5%AF%BE%E5%BF%9C%E3%81%A7%E3%81%8D%E3%81%BE%E3%81%99%E3%81%8B->
- [11] Power consumption analysis of bluetooth low energy commercial products and their implications for IoT applications. Electronics (Switzerland), 7(12), 2018
- [12] Khatoun, Rida and Zeadally, Sherali: Smart cities: concepts, architectures, research opportunities, Communications of the ACM, Vol.59, No.8, 2016
- [13] Kristanto, Slamet and Yashiro, Takeshi and Koshizuka, Noboru and Sakamura, Ken: Dynamic Polling Algorithm for Low Energy Garbage Level Measurement in Smart Trash Bin, Proceedings of the Second International Conference on IoT in Urban Space, No.92-94, 2016
- [14] Fedchenkov, Petr and Zaslavsky, Arkady and Sosunova, Inna: Enabling Smart Waste Management with Sensorized Garbage Bins and Low Power Data Communications Network, Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things, No.28, 2017
- [15] Outdoor LoRa/LoRaWAN Wireless I/O Module (最終閲覧日: 2020 年 5 月 7 日), https://www.advantech.com/products/23ed4776-1633-4901-a776-8532a23ea8b4/wise-4610/mod_b9c0a2e0-c841-4826-8008-36a91d837e1e