

平成 31 年度 公立はこだて未来大学卒業論文

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検討

戸澤 涼

情報アーキテクチャ学科 1016031

指導教員 (主) 稲村 浩 (副) 中村 嘉隆

提出日 2020 年 1 月 28 日

A Study on Energy Efficiency in Dense Wireless Sensor Network

by

Ryo TOZAWA

BA Thesis at Future University Hakodate, 2020

Advisor: Prof. Advisor, Coadvisor: Prof. Coadvisor

Department of Information Architecture

Future University Hakodate

January 31, 2014

Abstract— The majority of IoT sensor devices are driven by battery, power saving is critical issue. LoRaWAN achieves wide area coverage with low power consumption in wireless sensor network (WSN). LoRaWAN has a scalability problem that packet transmission rate decreases due to message collision when the number of devices in WSN increase. In this research, we aim to improve the energy efficiency of WSNs by using different types of wireless communication media at long and short distances based on the method of autonomously configuring a group of multiple nodes in WSN and the leader node will be sending aggregated data messages for the rest of members. As a contribution of this research, knowledge about power consumption efficiency in LoRaWAN by combining different radios and existing LoRa-only WSN is expected.

Keywords: LoRaWAN, BLE, Wireless Sensor Network, Electric Power Efficiency, Heterogeneous Wireless Signal

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ー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。本研究の貢献として、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及びデータの集約による消費電力の効率化に関する知見が見込まれる。

キーワード: LoRaWAN, BLE, Wireless Sensor Network, 電力効率, 異種無線センサネットワーク

目次

第1章	背景	1
1.1	背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	論文の構成	2
第2章	関連技術	3
2.1	LoRaWAN	3
2.1.1	Adaptive Data Rate (ADR)	3
2.2	Bluetooth Low Energy	4
2.2.1	Peripheral Device	4
2.2.2	Central Device	4
2.2.3	Peripheral Device Data Frame	5
第3章	関連研究	6
3.1	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	6
3.2	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	6
3.3	Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy Commercial Prod- ucts and Their Implications for IoT Applications	7
第4章	提案手法	8
4.1	センサノードグループ化	8
4.1.1	想定する環境	8
4.1.2	センサノードグループ化とグループ再構成の必要性	8
4.2	センサノードグループ化のアプローチ	8
4.2.1	トポロジ	8
4.2.2	センサネットワーク展開時のグループ化	8
4.2.3	平常時のグループ化の通信	9
4.2.4	センサノードの参加・離脱時の振る舞い	11
4.3	センサノードグループ再構成のアプローチ	11
4.3.1	自律型再グループ化	11
4.3.2	集中型再グループ化	13

第 5 章	研究課題	15
5.1	グループ化アルゴリズムの適応点の検討	15
5.2	通信容量削減による, グループ集約効率向上の検討	15
5.3	パケット到達率を考慮したグループ制御方式の検討	15
5.4	電力実測	15
5.5	実験目的	15
5.6	実験方法	15
5.7	実験結果	16
第 6 章	考察	17
6.1	グループ化の適応点について	17
第 7 章	結論と今後の展開	18
7.1	まとめ	18
7.2	今後の方針	18

第1章 背景

1.1 背景

WSN は, Machine to Machine (M2M) や Internet of Things (IoT) で必要となるセンサネットワーク技術である. WSN では, 個々のセンサノードと呼ばれるセンサがネットワークを構築し, センシング及びデータ通信を行う. WSN の利用用途は幅広く, 環境モニタリング (温度・湿度・照度・雨量), ビル管理 (照明制御・空調制御), スマートホーム, 物流 (物流監視・位置情報・空調制御) 等が挙げられる [1]. IoT センサでは低コストにも関わらず, 様々な環境下での利用が想定され, 常時電源供給とは限らない. IoT の代表例となるセンサデバイスは, バッテリー駆動という制約があるためデバイスの省電力化及び遠隔でのノード管理の必要性, さらに送信可能なデータサイズが小さいことや, ノード数の増加によるネットワークの混雑化が課題となっている. そこで, 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 (LPWA: Low Power, Wide Area) 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独自の通信方式を採用した, 省電力広域ネットワーク (LPWAN: Low Power Wide Area Network) プロトコルである. 特徴として, 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等が挙げられる. LoRaWAN は, 免許不要の ISM 帯域で動作するため同一チャネルでの干渉が問題となる可能性がある [2]. 加えて, LoRaWAN にはネットワーク内のデバイス数が増加したための頻繁な衝突によるパケット到達率の低下が挙げられる. このように, LoRaWAN はスケー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, 幾つかのセンサデバイスからなるグループを作成しグループの代表 (GL: Group Leader) 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, LoRaWAN は仕様上デバイス間通信が行えない点やその際にどのような手段でデバイス間通信が行われているのか考慮されていない. そこで本研究では, 市販されている LoRa と BLE が搭載されたモジュールに着目し, 遠距離通信は LoRa, 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, WSN の電力最適化を図る.

1.2 研究目的

本研究では, 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. LoRaWAN はノードや GW が安価で手に入るため, LoRaWAN を搭載した IoT ノードは将来的に増加すると考えられる. LoRaWAN の利用用途として, 長距離通信があげられるが都市部のような密集した地域では, ノード同士は隣接した場所に

配置される場合が考えられる．提案手法により，異種無線（LoRaWAN, Bluetooth Low Energy (BLE)）を組み合わせグループ化により，LoRaWAN の長距離伝送の回数を減らすことで，センサノードの消費電力削減が期待できる．

1.3 論文の構成

※コピペしました

本文は全 8 章から構成されている．第 1 章は本研究を行うに至った背景と研究目標について述べる．第 2 章では知識認証における画像認証の関連研究と履歴情報の関連研究と課題について述べる．3 章では 2 章で述べた課題とそれに対するアプローチについて述べ，本研究の提案手法について述べる．4 章では提案手法に対する認証実験と実験結果について述べる．5 章では 4 章の考察を述べる．6 章では注視継続率の検証実験について述べる．7 章では 6 章の考察を述べる．最後に 8 章でまとめと今後の課題について述べる．

第2章 関連技術

2.1 LoRaWAN

LoRaWAN は, LoRa という Semtech 社が開発した低消費電力・長距離通信用変調技術における広域ネットワーク (WAN: Wide Area Network) の規格である. LoRaWAN のネットワークは, 3つのコンポーネントからなり, エンドデバイス (センサノード), ゲートウェイ (GW: Gateway), アクセス制御・ネットワーク制御を行うネットワークサーバ (NS: Network Server) で構成されています. スター型のトポロジを採用し, エンドデバイスはゲートウェイを介しネットワークサーバに接続する通信モデルである. LoRaWAN のデバイスは3つのカテゴリ 2.1 を採用している. 最も利用されているのはクラス A で, 消費電力が最も抑えられることや送信後の決められた時間にのみ受信が可能という特徴をもつモデルである. LoRaWAN には, データレートという係数 2.2 が7段階あり, 伝送量・ノイズ耐性が変化する. Soracom という国内の LoRaWAN プロバイダーが, ユースケース 2.3 の例を挙げている.

2.1.1 Adaptive Data Rate (ADR)

LoRaWAN の特徴でもある Adaptive Data Rate (ADR) は, NS からセンサノードのデータレートを制御する仕組みである. センサノードの通信状況に合わせて動的に制御する. 例として, センサノードと GW が近い距離にあると判断した場合, データレートを高い値に設定する. 逆に, センサノードと GW が遠い距離にあると判断した場合, データレートを低い値に設定する. データレートを上げることで, 送信時間が短くなり消費電力を抑えることが可能である. 送信時間を短くすることに通信チャネル専有時間が削減されるためより多くのセンサノードをカバーすることが可能である.

表 2.1: LoRaWAN のクラス

カテゴリ	概要
クラス A	<ul style="list-style-type: none">消費電力が最も少ない上り送信時のみ下り受信可能センサデバイスの中で最も採用されている
クラス B	<ul style="list-style-type: none">消費電力がクラス A と比較し多いスケジュールされた時刻に下り受信可能
クラス C	<ul style="list-style-type: none">消費電力が最も多く電源があることが望ましい双方向通信可能

表 2.2: LoRaWAN の DR

DR 値	拡散係数	ビットレート (bps)	受信感度 (dBm)
DR0	SF12	250bps	-137
DR1	SF11	440bps	-134.5
DR2	SF10	980bps	-132
DR3	SF9	1760bps	-129
DR4	SF8	3125bps	-126
DR5	SF7	5470bps	-123
DR6	SF6	11000bps	-118

表 2.3: 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

2.2 Bluetooth Low Energy

BLE は、既存の Bluetooth Classic よりも低電力を目的として開発された近距離通信用の通信規格である。BLE はスター型のトポロジーを採用し、送信側の周辺機器 (PD: Peripheral Device) と受信及び通信制御側のサーバ (CD: Central Device) の通信モデルである。BLE の伝送量は、1Mbps である。

2.2.1 Peripheral Device

PD は、CD からの要求に応える形で通信する。デバイスの例としてビーコン等が挙げられる。BLE デバイスは、通信するにあたりペアリングする必要がある。アドバタイズ (Advertise) という自身のデバイス情報を報知する動作があり、アドバタイズインターバルという一定期間のもとブロードキャストで発信し続ける。

2.2.2 Central Device

CD は、PD との接続要求を確立し通信を制御する。PD の Adv パケットを受信したのち、接続要求を行い要求を行い要求を行い接続を確立する。

2.2.3 Peripheral Device Data Frame

(のちに、提案システムのノードの参加時において、BLE パケットの中身にデータを載せる予定なのでその説明) 前述のように、PD は自身の報知のため一定間隔で、Adv を行う。下記に Adv Data の詳細を記述する。

第3章 関連研究

3.1 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

手柴らが提案する手法 [1] は, LoRaWAN にはノード数のスケーラビリティ, 及び拡散係数による通信時間が大きく異なるという課題がある. 消費電力量を抑制しノードのバッテリー寿命を延伸するため, GW とノードの距離, 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, Group Coordinator と呼ぶ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, センサデバイスは通信が可能な LoRaWAN のクラス B である. センサデバイス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, 拡散係数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. グループ化により, センサデバイス全てが 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. 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) 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. 課題としてノード間通信の方法が LoRaWAN のみで行う等明記されていない点, グループ編成時にネットワークサーバにノードの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が考慮されていないことやグループの再編が行われないため GC の消費電力量が増加する点があげられる. 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.

3.2 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

辻丸らが提案手法 [5] 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. 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たゲートウェイの配置を行う. ゲートウェイを複数配置し輻輳を減少させることで消費電力を削減しているが, 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点やゲートウェイの同時接続数の上限が考慮されていない点が挙げられる.

表 3.1: 消費電力

種類	A-101 (mW)	Cypress (mW)
PD	0.201	0.423
CD	0.267	0.054

3.3 Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy Commercial Products and Their Implications for IoT Applications

Eduaedora ら は, 2018 年のスマートフォンへの Bluetooth 搭載率が 100 %であることを踏まえ, 消費電力を分析することで最適な低電力アプリケーションの構築を目的とし, BLE 商用プラットフォームの消費電流の測定値 3.1 を提示した [3].

第4章 提案手法

4.1 センサノードグループ化

4.1.1 想定する環境

センサデバイスは、異種無線（LoRaWAN, BLE）通信機能を持つモジュールを搭載することを想定する。センサデバイスは、異種無線（LoRaWAN, BLE）通信機能を持つことを想定する。LoRaWAN のネットワークは、3つのコンポーネントからなり、センサノード、ゲートウェイ (GW: Gateway), ネットワーク制御を行うネットワークサーバ (NS: Network Server) で構成されたスター型トポロジである。

4.1.2 センサノードグループ化とグループ再構成の必要性

提案手法では、消費電力の削減、及びバッテリー残量の平準化の面で消費電力の効率化を図る。近傍の通信メッセージを代表にて集約し GW ノードまでの長距離伝送の利用を減らすことで省電力化を狙う。管理コストを削減するためバッテリー交換のタイミングは同時にまとめて行える方が良く、センサノード間でのバッテリー残量の平準化の実現が望ましい。省電力化のため、異種無線（LoRaWAN, BLE）を用いて、グループ化により近傍ノード (GM: Group Member) のデータを代表ノード (GL: Group Leader) が集約する (図1)。バッテリー残量平準化のため、グループの再構成を行う。起動時やトポロジ変化後などグループが定義されていない展開時の設定手法と稼働中に行われる再構成手法を以下に説明する。

4.2 センサノードグループ化のアプローチ

4.2.1 トポロジ

グループは、ある数のセンサノードから構成される。グループ化のトポロジは、グループ内では GM ノードに GL ノードが接続し GL ノードと GW ノードが接続するスター型トポロジとなる。

4.2.2 センサネットワーク展開時のグループ化

センサネットワークが展開される初回起動時にグループを作成する手法を述べる。GW ノードがセンサノードのトポロジを把握するため、各ノードが周囲のノード情報を探索する。下記にシーケンス図 4.2 を示す。

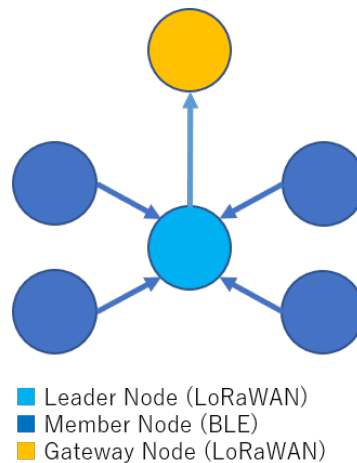


図 4.1: グループ化のトポロジ

1. グループを構築するに当たり，GW ノードに現在の WSN トポロジを通知する必要がある．そのため，センサノード起動時に，BLE にて自身の情報を発信し，同時に周囲のセンサノード情報を収集する．近傍センサノードのリストを作成した後，GW ノードへ送信する．
2. センサノードはリスト送信後，GW ノードからグループ構成の通知が来るまで LoRaWAN にて通信を行う．
3. GW ノードがセンサノード情報を集約した後，センサノードの固有 ID，及び個々の信号強度を用いて重複ノードのないグループを作成しグループごとに 1 つ GL ノードを選出する．センサノードが LoRaWAN にて次に接続した場合，Downlink でグループ構成を通知しシーケンスは終了する．

4.2.3 平常時のグループ化の通信

平常時のグループの通信フローを述べる．通信方式は，グループ内の通信に BLE，GL ノードと GW ノードの通信に LoRaWAN を用いる．グループ内の通信は，インターバルが設けられ同期的に通信を行う．下記にシーケンス図 4.3 を示す．

1. GM ノードは GL ノードとの接続要求のため，Adv を開始する．
2. GL ノードは GM ノードとの接続確立のため，BLE にて Scan を開始する．
3. GL ノードは接続確立後，GM ノードからセンサデータを集約し GW へ送信する．
4. WSN に新たなノードが参加した際にグループに所属するため，GL は自身のサービス UUID を載せ Adv を開始する．

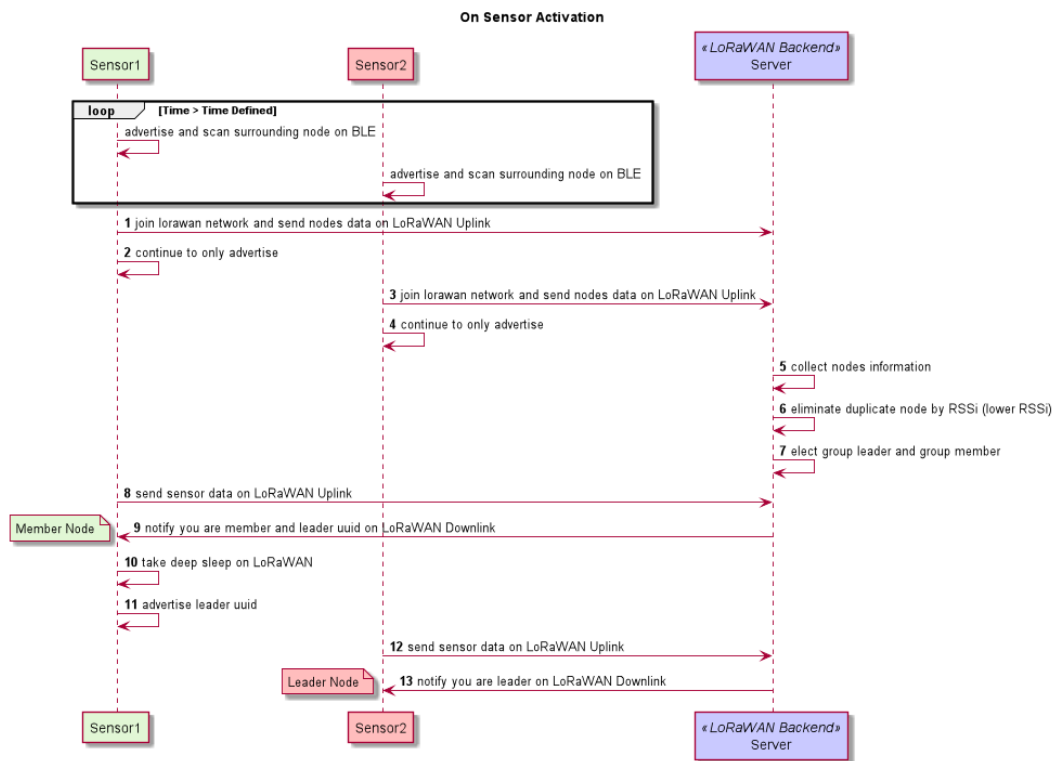


図 4.2: グループ化の通信方式

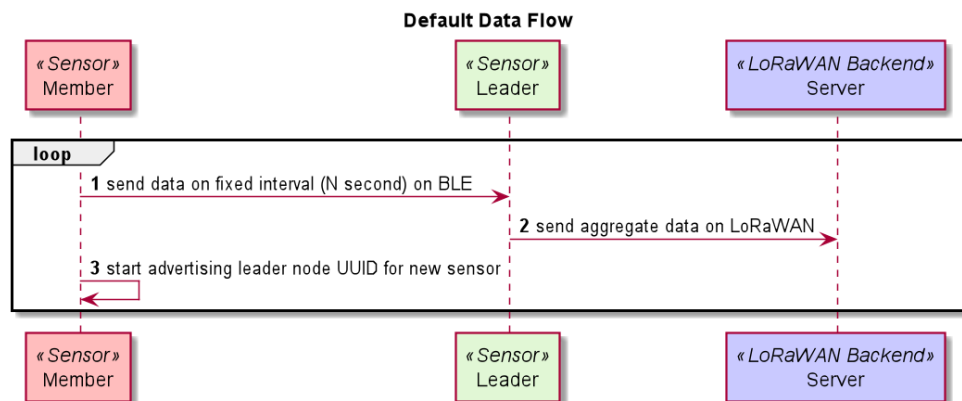


図 4.3: グループ化の通信方式

4.2.4 センサノードの参加・離脱時の振る舞い

いくつかのセンサノードが、グループへ参加・離脱する際の手法を述べる。

前者について下記にシーケンス図 4.4 を示す。

1. 新規センサノードがグループに参加するため、参加するグループを決定する必要がある。GL ノードはデータ集約時以外は、Adv Packet に自身の BLE サービス UUID を載せ Adv を行う。
2. 新規センサノードは、起動時に BLE スキャンを実行し周囲に参加可能なグループがあるか探索する。
3. 発見した場合は、そのグループに参加し、そうでない場合は LoRaWAN で直接センサデータを送信する。

後者について、下記にシーケンス図 4.5 を示す。

1. ノードが故障や電池切れで離脱する場合は、NS がデバイスを管理しているので、N 回通信が来なかった場合に、グループリストからセンサノードを取り除く。
2. GL ノードの次回通信時に、更新したグループリストを通知する。

4.3 センサノードグループ再構成のアプローチ

4.3.1 自律型再グループ化

グループ内で、GL を交代し電力の平準化を図る自律型グループ化について述べる。全センサノードは、消費電力見積もりのため、LoRaWAN 及び BLE での通信回数を保持する。消費電力量は下記モデル式をもとに見積もり可能である。下記にシーケンス図 4.6 を示す。

1. 次の GL ノードを選出するため、GM ノードはセンサデータとともに、消費電力量を算出し通信内容に載せる。
2. GL ノードは GM ノードの消費電力量を基に、バッテリー容量が最も高い（消費電力量の少ない）センサノードを次の GL として選出する。
3. GL ノードは GM ノードとの通信を切断する際に GM ノードへ次の GL ノードを通知する。
4. その後、データを集約し GW ノードへ送信する。

これにより、グループ内でのセンサノードの消費電力を平準化が見込める。

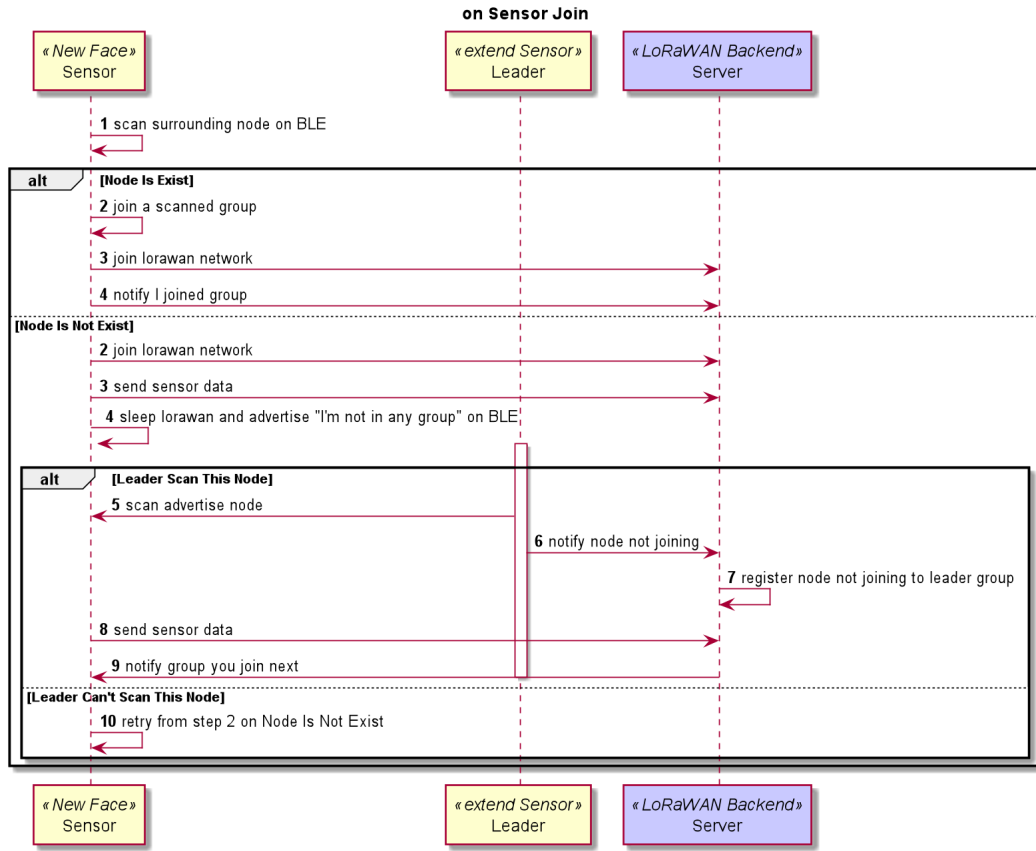


図 4.4: ネットワーク参加時の振る舞い

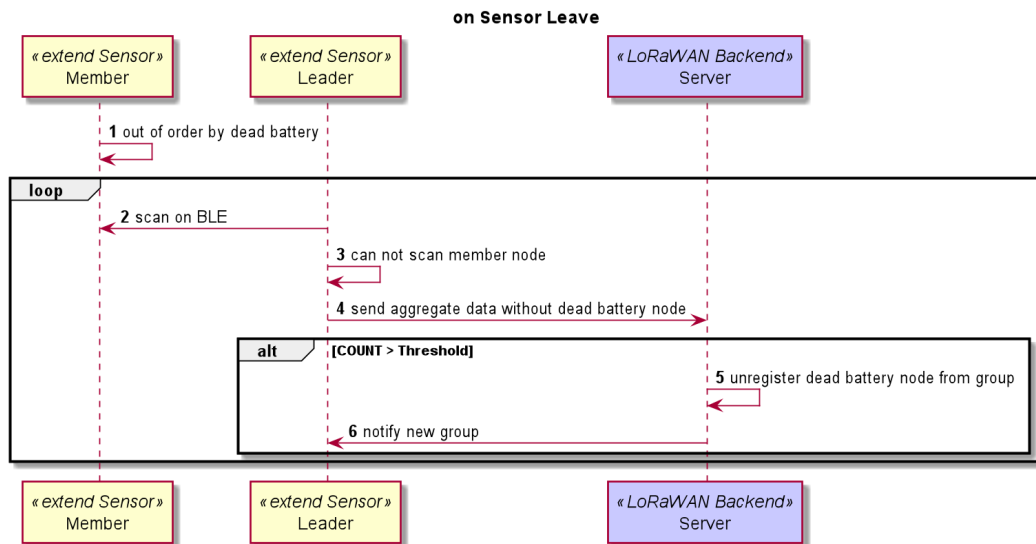


図 4.5: ネットワーク離脱時の振る舞い

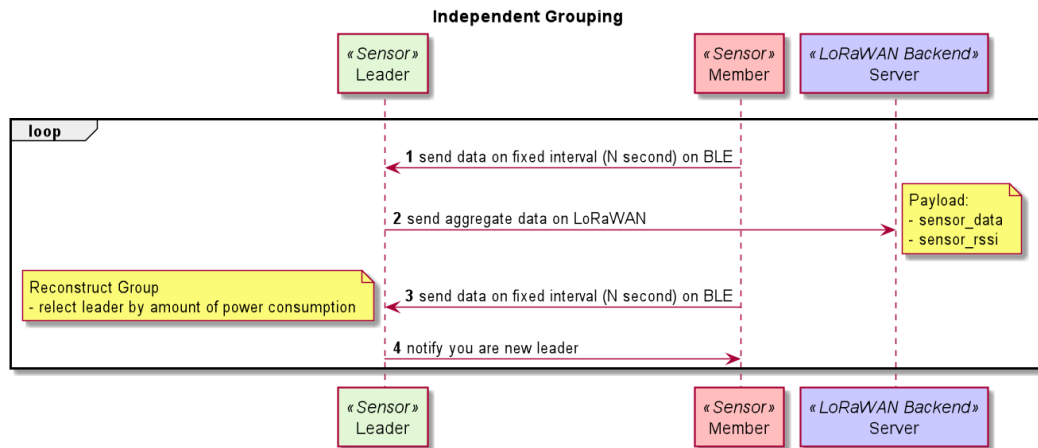


図 4.6: 自律型再グループ化

4.3.2 集中型再グループ化

グループの構成を変更し，WSN 全体での電力の平準化を図る集中型グループ化について述べる．WSN 内にセンサノードが追加されていくと，初期に構築したグループでは最適でない場合が考えられる．そのため，GW ノードはセンサノードから取得したデータ（デバイス固有 ID・信号強度）を用いて最適なグループを再構成する．下記にシーケンス 4.7 を示す．

1. GM ノードは，定常時と同様センサデータを GL ノードへ送信する．
2. GW ノードは，データとして各センサノードの異種無線利用回数から消費電力量を算出する．
3. GW ノードは，センサデータの信号強度（RSSI），消費電力量からグループ間でのノード移動や GL の交代などの組み合わせを検討し，グループを再構成する．
4. GW ノードは，センサノードのダウンリンク時に再構成したグループを通知する．

これにより，センサネットワーク全体の消費電力を平準化でき，センサ交換機会の削減が見込める．

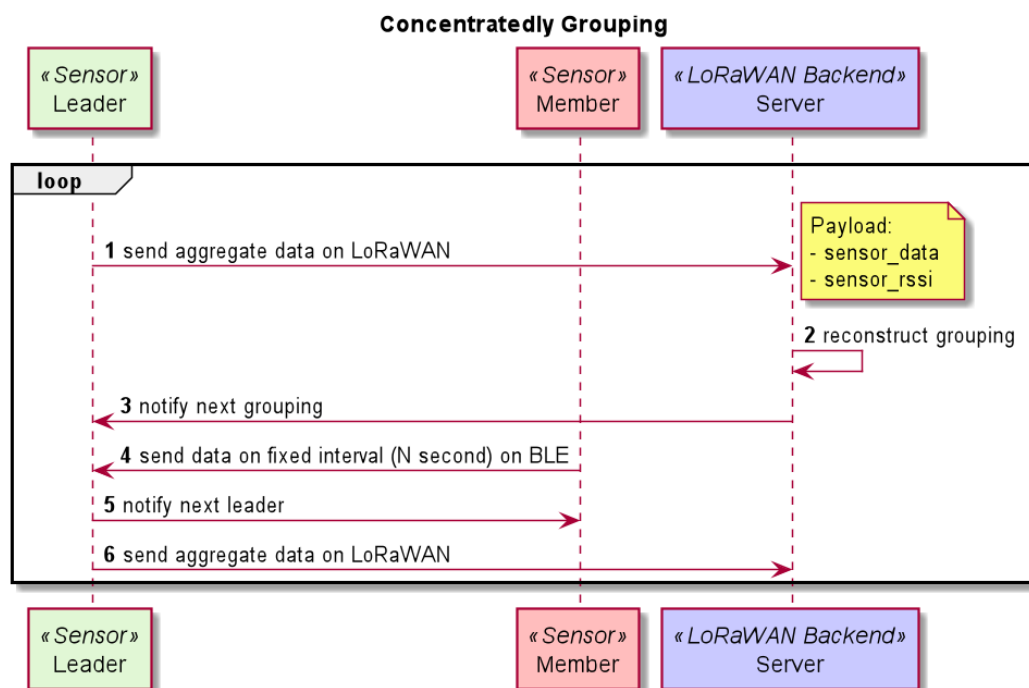


図 4.7: 集中型グループ化

第5章 研究課題

5.1 グループ化アルゴリズムの適応点の検討

グループ化アルゴリズムの適応点を明らかにするため、BLE が LoRa より消費電力において有利となる条件を求める必要がある。適応点とは、既存手法に対し提案手法が消費電力削減が見込めることを表す。前項で述べたモデル式の関係が以下ようになる（なんか大小関係表した式を書く）ことである。（もう古い）計測には、LoRa、及び BLE 搭載のセンサモジュールを用いて、一定時間毎にデータ送信を行う。バッテリー容量が空になった際にデータ送信量とバッテリー容量から消費電力を見積もる。

5.2 通信容量削減による、グループ集約効率向上の検討

既存手法では、グループ化において通信方式は集約ノードを経由して通信を行う代理送信であった。提案手法では、通信経路の集約だけでなく、送信メッセージの集約の観点で、グループの集約効率及び集約ノードの通信回数を削減する。GL ノードが複数メッセージを集約することで個々のノードが送信した場合に比べヘッダなど制御情報による通信量を削減できるように方式を検討する。

5.3 パケット到達率を考慮したグループ制御方式の検討

LoRaWAN は、Aloha アルゴリズムを採用しているため、拡散率が重複した通信による衝突は考慮されていない。そのため、グループ作成時に適切な拡散率を割り当てる必要がある。

5.4 電力実測

5.5 実験目的

前項 5.1 を満たすため、LoRaWAN における消費電力の実測を行った。

5.6 実験方法

市販の Arduino 互換 LoRaWAN モジュール及び消費電力計を用いて、起動から初回送信、定常時の送信、スリープとイベントごとに消費電力を計測した。実験環境は、下記の

表に示す。LoRaWAN のノードと GW を，高低差のある公立はこだて未来大学と自宅間に配置した。距離は約 3.5 km であった。消費電力計測機が保存できる容量に限りがあるため，3 試行を 1 セットとした。LoRaWAN の ADR 機能を適応し，スリープ時間は 4 秒に設定し，30 秒間の計測を 4 セット 12 試行した。

5.7 実験結果

実験結果を（表）に示す。

第6章 考察

6.1 グループ化の適応点について

表1のデータを参照すると, LoRaWANの消費電力がBLEの消費電力を大きく上回ることが分かった. 実験の実測値(表4)と文献のCypressの参考値(表1)を代入する. 結果として1送信/分において, 提案手法を用いた場合, 1台あたり約112mWから89mWの消費電力削減効果が見込める.

第7章 結論と今後の展開

7.1 まとめ

本研究では、WSNにおいて長距離伝送としての利用が期待される LoRaWAN におけるスケーラビリティと電力効率の問題を解決するため、異種無線（LoRaWAN, BLE）を用いたセンサノードのグループ化方式の検討を行った。LoRaWAN を用いた WSN におけるスケーラビリティ向上のため、異種無線のグループ化 手法を提案した。本手法の実現性確認のために、モデルを立て、評価に必要な消費電力を計測した。結果として、既存手法と提案システムを用いた場合、消費電力の観点で有効であることが分かった。

7.2 今後の方針

提案手法をシステム化するにあたり、課題がある。LoRaWAN は GW への同時接続台数に制限があるため、センサノードが増加するとパケット到達率が低下する恐れがある。そのため、グループに割り当てる通信タイミングや GL ノードに割り当てる LoRaWAN の拡散率等を検討する必要がある。また、前項で述べたシステムのシーケンスを満たすため、グループ化における詳細な消費電力を求める必要がある。そのため、BLE のアドバタイズ、スキャン、ペアリングなど各イベントにおいての平均通信時間、消費電力の実測を行う必要がある。（性能限界についても検討する必要もある）グループにぶら下がるのが可能なノード台数（これは、LoRaWAN 一回の送信で Payload に載ること及び BLE での同時接続数が考えられる）

謝辞

本研究及び本論文を作成するにあたり，お忙しい中，熱心にご指導してくださった稲村浩先生，中村嘉隆先生を始め，日頃から研究を共に頑張ってきた研究室の方々に深く感謝いたします．

参考文献

- [1] Analyzing LoRa: A use case perspective. *IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2018 - Proceedings*, 2018-January:355–360, 2018.
- [2] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melia-Segui, and Thomas Watteyne. Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [3] Power consumption analysis of bluetooth low energy commercial products and their implications for IoT applications. *Electronics (Switzerland)*, 7(12), 2018.
- [4] Sadao Obana. 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 手柴 瑞基 湯 素華 小花 貞夫 Proposal on Node Grouping and Communication Control for Improving Network Efficiency of LoRaWAN. 2018(13):1–8, 2018.
- [5] 辻丸勇樹, 坂本龍一, 近藤正章, and 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, 32(1):46–53, 2017.
- [6] Mattia Rizzi, Alessandro Depari, Paolo Ferrari, Alessandra Flammini, Stefano Rinaldi, and Emiliano Sisinni. Synchronization Uncertainty Versus Power Efficiency in LoRaWAN Networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(4):1101–1111, 2019.
- [7] LoRaWAN を牽引する「LoRa」の概要と利用動向. https://www.soumu.go.jp/main_content/000450875.pdf.
- [8] LoRaWAN のユースケース. <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->.
- [9] Bluetooth 4.0: Low Energy. <https://californiaconsultants.org/wp-content/uploads/2014/05/CNSV-1205-Decuir.pdf>.

付録その1

付録その1(プログラムのソースリストなど)を必要があれば載せる

付録その2

付録その2(関連資料など)を必要があれば載せる

図 目 次

4.1	グループ化のトポロジ	9
4.2	グループ化の通信方式	10
4.3	グループ化の通信方式	10
4.4	ネットワーク参加時の振る舞い	12
4.5	ネットワーク離脱時の振る舞い	12
4.6	自律型再グループ化	13
4.7	集中型グループ化	14

表 目 次

2.1	LoRaWAN のクラス	3
2.2	LoRaWAN の DR	4
2.3	LoRaWAN のユースケース	4
3.1	消費電力	7