

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

公立はこだて未来大学
システム情報科学部 情報アーキテクチャ学科
高度 ICT コース 1016031

戸澤涼

指導教員 稲村浩

提出日 20XX 年 1 月 XX 日

BA Thesis

A Study on Energy Efficiency in Dense Wireless Sensor Network

by

Ryo TOZAWA

School of Systems Information Science, Future University Hakodate
Advanced ICT Course, Department of Media Architecture
Supervisor: Hisoshi INAMURA

Submitted on January XX, 20XX

A Study on Energy Efficiency in WSN

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	序論	1
1.1	背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	論文の構成	2
第 2 章	関連技術	3
2.1	LoRaWAN	3
2.2	Bluetooth Low Energy	5
第 3 章	関連研究	7
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	7
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	8
3.3	Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy Commercial Products and Their Implications for IoT Applications	8
第 4 章	研究課題	9
4.1	グループ化におけるセンサノード間通信についての検討	9
4.2	グループ化のアルゴリズムについての検討	9
4.3	GC の消費電力増加についての検討	9
4.4	通信容量削減による, グループ集約効率向上の検討	10
4.5	センサノードの近接性を考慮した拡散率割当の検討	10
第 5 章	提案手法	11
5.1	グループ化	11
5.2	センサノードグループ化のアプローチ	12
5.3	センサノードグループ再構成のアプローチ	17
第 6 章	実測に基づくグループ化アルゴリズムの適応点の評価	21

6.1	実験目的	21
6.2	実験方法	21
6.3	実験結果	24
第 7 章	考察	26
7.1	グループ化の適応点について	26
第 8 章	まとめと今後の方針	27
8.1	まとめ	27
8.2	今後の方針	27
参考文献	29
.1	利用したソースコード	31

第 1 章

序論

1.1 背景

WSN (WSN: Wireless Sensor Network) 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 センサでは安価で入手することが可能なため, 様々な環境下での利用が想定される. しかし, このような場合において常時電源が供給されているとは限らない. 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 (Industry Science and Medical) 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 [2]. 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 [3] 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, スケーラビリティ実現のためグループ化の手法を用いるには, デバイス間の直接通信が必要になるが, LoRaWAN はのみでは仕様上実現が困難である点や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．そこで本研究では，市販されている LoRaWAN と Bluetooth Low Energy (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，上記の課題を解決し 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 (LoRaWAN) 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．そこで，異種無線 (LoRaWAN, BLE) を組み合わせるグループ化により，LoRaWAN の長距離伝送の回数を減らすことで，センサネットワーク全体の消費電力削減が期待できる．

1.3 論文の構成

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，提案システムに利用する通信規格について述べる．第 3 章では，LoRaWAN におけるセンサノードのスケーラビリティ及び消費電力削減における関連研究と課題について述べる．第 4 章では，3 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．第 5 章では提案手法を実現するにあたり必要となる課題について述べる．第 6 章では，課題を解決するための実験内容と実験方法，実験結果について述べる．第 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、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 LoRa という規格に則った通信機能を指す。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) で構成されている。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 (表 2.1 参照) による通信モードを採用している。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も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 (表 2.2 参照) が 7 段階あり、拡散率・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 (表 2.3 参照) の例を挙げている [4]。

2.1.1 拡散率 (SF: Spread Factor)

LoRa 物理層は、スペクトラム拡散変調 (SSM: Spread Spectrum Modulation) を使用している。SSM は、高い周波数シーケンスにおいて、より広い帯域幅にわたってベース信号を拡散し、消費電力の低減、電磁妨害に対する耐性を高める。ベース信号の拡散率は可変でトレードオフであり、特定の利用可能な帯域幅に対して、より大きい拡散率はビットレートを低減させる。また、伝送時間を増加させることによってバッテリー寿命を減少させる。

2.1.2 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、通信チャン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 は、頻繁に接続・切断を繰り返すようなユースケースに特化し、ボタン電池 1 つでも数年の寿命を実現している。そのため、省電力化が求められる IoT での利用が期待されている。BLE の伝送速度は、1Mbps 程度である。

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。広告 (Advertisement) 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 Advertisement Packet を受信したのち、データ通信を行うため、接続確立作業を行う。

2.2.3 BLE の通信フロー

(こんな図が欲しい) BLE では、データ通信を行うにあたり主に 3 のイベントが発生する。下記図 2.1 に示す。まず、PD は自身の報知のため「アドバタイズ」を行う。CD は、Advertisement 受信後、PD に追加の情報を要求する「スキャン要求」を行う。PD は、CD に対して「スキャン応答」し CD が「接続要求」することで初めてデータ通信可能となる。

2.2.4 LE Packet Structure

BLE 通信に用いるデータ構造を下記表 2.4 に示す。LE Packet Structure は、4 つのフィールドからなる。プリアンブル (Preamble) は通信相手にフレーム送信の開始を認識させ、同期をとるタイミングを指定するフィールドである。アクセスアドレス (Access Address) は、接続時に通信相手から通知されるデータで、自身に送信されたデータかを判断する識別子を指定するフィールドである。プロトコルデータユニット (PDU: Protocol Data Unit) は、通信パケットに載せるデータを指定するフィールドである。巡回検査符号 (CRC) は、受信誤りを検出するための CRC 値を指定するフィールドである。

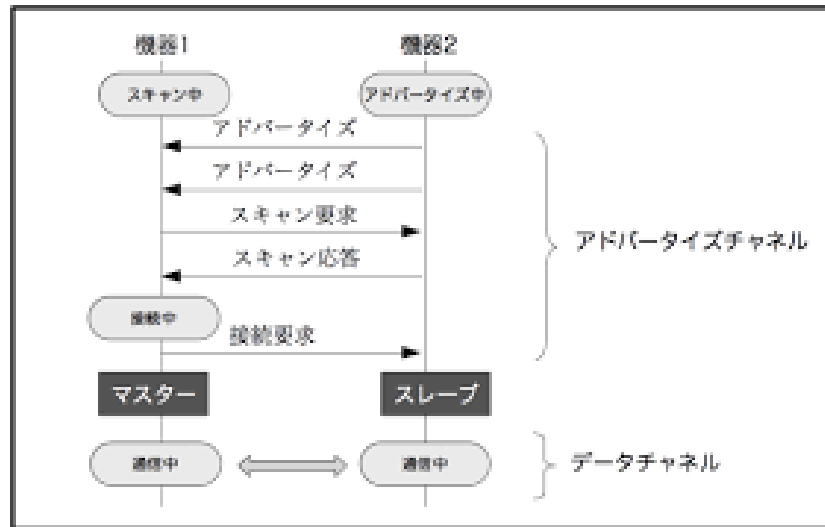


図 2.1 BLE の通信フロー

表 2.4 LE packet structure

Preamble	Access Address	PDU	CRC
(1 octet)	(4 octets)	(2 to 39 octets)	(3 octets)

表 2.5 Advertising Channel PDU

Header	Advertiser's Address	Advertiser's Data
(2 octets)	(6 octets)	up to 31 octets

2.2.5 Advertising Channel PDU

BLE 通信のアドバタイズに用いるデータ構造を下記表 2.5 に示す。Advertising Channel PDU は、3つのフィールドからなる。前述した LE Packet Structure における PDU の部分にあたる。ヘッダ (Header) は、PDU の種類等を指定するフィールドである。アドバタイザーアドレス (Advertiser's Address) は、Adv Data の送信元の識別子を指定するフィールドである。アドバタイザーデータ (Advertiser's Data) は、(BLE の通信フローの節) で述べた各イベントにおいて必要なデータを指定するフィールドである。

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

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 [5] 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: 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を用いて自律的にグルーピングを行う。

表 3.1 消費電力

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

3.2 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 [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。

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やこちらも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。そこで、本研究では電力平準化のため、グループ化を活かしデータ集を行うセンサノードを入れ替えを行う。

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実験を行った。[6].BLE は、起動、データ送信、データ受信、データ処理、スリープなど様々なイベントがある。各イベントのピーク電流では、バッテリー寿命を決定することが出来ないため、前述した BLE の PC、CD において平均電力（表 3.1 参照）を示した。電力測定に用いられたプラットフォームは、Arduino 101 (Intel A-101), Cypress Semiconductor CY8CKIT-042-BLE-A であった。

第 4 章

研究課題

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．そこで，異種無線（LoRaWAN, BLE）を組み合わせるグループ化により，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が期待できる．

4.1 グループ化におけるセンサノード間通信についての検討

既存研究 [5] では，集約ノードが，グループ内のセンサノードの通信を集約すると述べていた．しかし，LoRaWAN のプロトコルでは，センサノードと GW ノードの通信しか対応しておらず，集約ノードとグループ内のセンサノードは，現状困難であると言える．そのため，グループ化において，センサノード間通信の規格を検討する必要がある．

4.2 グループ化のアルゴリズムについての検討

既存手法 [5] では，センサノードの位置を手動で設定し，NS がグループを作成するというものであった．センサノードの接続台数を増加できるグループ化手法では，全てのセンサノードの位置を事前に NS が把握しているというのは現実的ではない．そのため，センサノード起動時（センサネットワーク展開時）にグループの構成手法を検討する必要があると考える．また，センサノードは安価で手に入ることやバッテリー容量に制限があるため，頻繁なセンサノード数の増減が考えられる．そのため，ネットワークトポロジ変更の際にグループの再構成が必要であると考ええる．

4.3 GC の消費電力増加についての検討

既存手法 [5] では，集約ノードが，グループ内のセンサノードの通信を集約すると述べていた．これにより，GW ノードに接続するセンサノードが減りスケーラビリティを向上させ

ることができる。しかし、GC ノードでの通信回数が増加するため、集約ノードが電力を多く消費することになる。消費電力平準化のため、集約ノードの入れ替えを考慮する必要があると考える。

4.4 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 [5] のグループ化における通信方式は、集約ノードを経由して通信を行う代理送信であった。しかし代理送信では、通信のオフロードにより、スケーラビリティは向上するが集約ノードの通信回数が増加することになる。消費電力削減のため集約ノードにて通信データを集約し、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する必要があると考える。

4.5 センサノードの近接性を考慮した拡散率割当の検討

既存研究 [3] では、LoRaWAN は長距離通信になるほど消費電力が増加するため、GW ノードとセンサノードの距離をもとに適切な拡散率を割り当てていた。しかし、シミュレーションの環境が密集した住宅街であったため、隣接したノードが同様の拡散率のもと通信を開始した場合に、衝突が発生し、パケット到達率が大きく低下することが考えられる。グループ化にも同様のことが言え、隣接したグループにおいて、拡散率の割当や通信タイミングの制御を検討する必要がある。

第 5 章

提案手法

5.1 グループ化

前項で述べた研究課題を満たすため、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の定義、また異種無線によるグループ化が既存の LoRaWAN による通信方式と比較し消費電力の観点で有効であるか証明する必要がある。

5.1.1 想定する環境

想定するセンサデバイスは、異種無線の通信機能を持つモジュールを搭載している。想定する LoRaWAN 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) から構成されたスター型トポロジである。LoRaWAN は、デバイスが安価であり利用において免許を必要としないため、都市部のような密集地域では、センサノードが隣接している可能性が考えられる。従って、想定する環境は、異種無線によるグループ化の適応機会が望める都市部のようなセンサノードが密集した地域である。

5.1.2 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、研究課題 4.3 における通信の集約を行うノードの消費電力が増加する課題を解決するため、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。バッテリー残量の平準化のため、グループ内での GL の入れ替えや NS が俯瞰的に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

表 5.1 モデル式のパラメーター

W_{dr2}	LoRaWAN (DR2) での 1 送信あたりの消費電力量
W_{scan}	PD の消費電力量
W_{adv}	CD の消費電力量
N	グループのノード台数

説明する.

5.1.3 グループ化アルゴリズムの適応点の検討

異種無線による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 LoRaWAN 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, 既存の LoRaWAN の通信方式に対し提案手法が消費電力削減の見込みがあることを表す. 下記に, LoRaWAN のみの既存方式 (表 5.1 参照) と LoRaWAN, BLE を用いたグループ化方式 (表 5.2 参照) の消費電力モデル式とパラメータ (表 5.1 参照) を示す. 以上のモデル式を用いて, グループ化の適応点を表した (表 5.3 参照) を下記に示す.

$$E = W_{dr2}N \quad (N \geq 2) \quad (5.1)$$

$$E = W_{dr2}N + W_{scan} + (N - 1)W_{adv} \quad (N \geq 2) \quad (5.2)$$

$$W_{dr2}N \leq W_{dr2}N + W_{scan} + (N - 1)W_{adv} \quad (N \geq 2) \quad (5.3)$$

5.2 センサノードグループ化のアプローチ

5.2.1 トポロジ

研究課題 4.1 のグループ化におけるセンサノード間の通信規格が定められていない課題を解決するため, 異種無線によるグループ化を提案する. グループはある数のセンサノードから構成される. グループのトポロジ (図 5.1 参照) は, グループ内での通信と GL ノードと GW ノードの通信と 2 種類あり, ノード間通信の方式は, 前者に BLE, 後者に LoRaWAN を用いる.

5.2.2 グループのスリープ時における通信

グループ化において, メッセージ集約時以外の通信の振る舞いについて述べる. GM ノードは, 集約時以外はスリープモードに入り次の通信を待機する. GL ノードは, 新たなノード

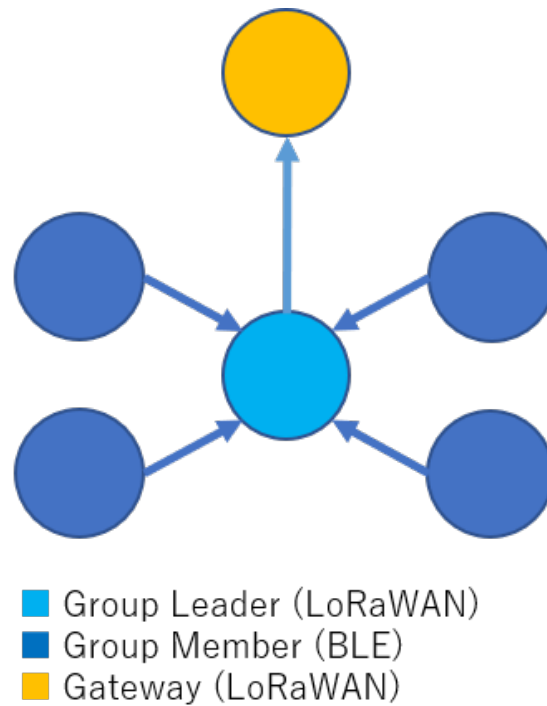


図 5.1 グループ化のトポロジ

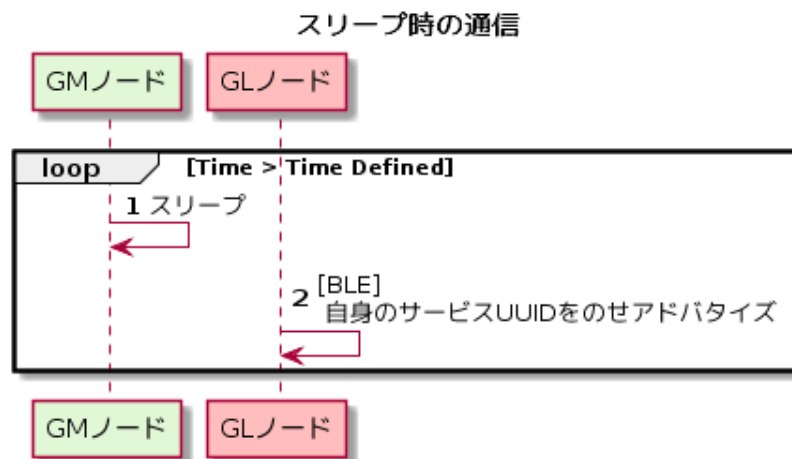


図 5.2 スリープ時のグループ化の通信方式

ドが増えた場合にグループに参加するため、BLE にて自身の BLE の固有 ID (Peripheral Service UUID) をペイロード (Advertising Channel PDU) に載せ発信する (Advertising). 下記にシーケンス (図 5.2 参照) を示す.

5.2.3 センサネットワーク展開時のグループ化

研究課題 4.2 の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 NS が把握しているというのは現実的ではないという課題を解決するため、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提案する。GW ノードが WSN のトポロジを把握しグループを構成するため、各センサノードが初回起動時に周囲のセンサノード情報を探索する。下記にシーケンス（図 5.3 参照）を示す。

1. グループを構築するに当たり、GW ノードは現在の WSN トポロジを把握する必要がある。そのため、センサノードは起動時に BLE にて自身の LoRaWAN の情報 (DevEUI) を報知し、同時に周囲のセンサノード情報を収集する (スキャン)。センサノードは近傍の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 (図 5.3 シーケンス番号 1-2 参照)。
2. GW ノードは、グループを作成するためセンサノードの情報が到達を一定時間待機する (図 5.3 シーケンス番号 3 参照)。
3. 収集した情報からグループを作成するため、GW ノードはセンサノード情報を一定時間集約した後、センサノードの LoRaWAN の固有 ID (DevEUI)、及び個々の LoRaWAN, BLE の信号強度 (RSSI) 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 (図 5.3 シーケンス番号 4-5 参照)。
4. センサノードが LoRaWAN にて次の接続をした際、グループ構成を通知し、各センサノードは、グループの通信に従う (図 5.3 シーケンス番号 6-9 参照)。

5.2.4 定常時のグループ化の通信

定常時のグループの通信フローを述べる。通信方式は、前述したトポロジ (5.2.1 参照) に従う。グループ内の通信は、センシングのタイミングが設けられ同期的に通信を行う。下記にシーケンス (図 5.4 参照) を示す。

1. GM ノードは GL ノードとの接続要求のため、BLE にてアドバタイズメントを開始する (図 5.4 シーケンス番号 1 参照)。
2. GL ノードは GM ノードとの接続確立のため、BLE にてスキャン要求を開始する (図 5.4 シーケンス番号 2 参照)。
3. GL ノードは、スキャン応答受信後、接続確立する (図 5.4 シーケンス番号 3-4 参照)。
4. GL ノードは、GM ノードからセンサデータを集約し、LoRaWAN にて GW ノードへ送信する (図 5.4 シーケンス番号 5-6 参照)。

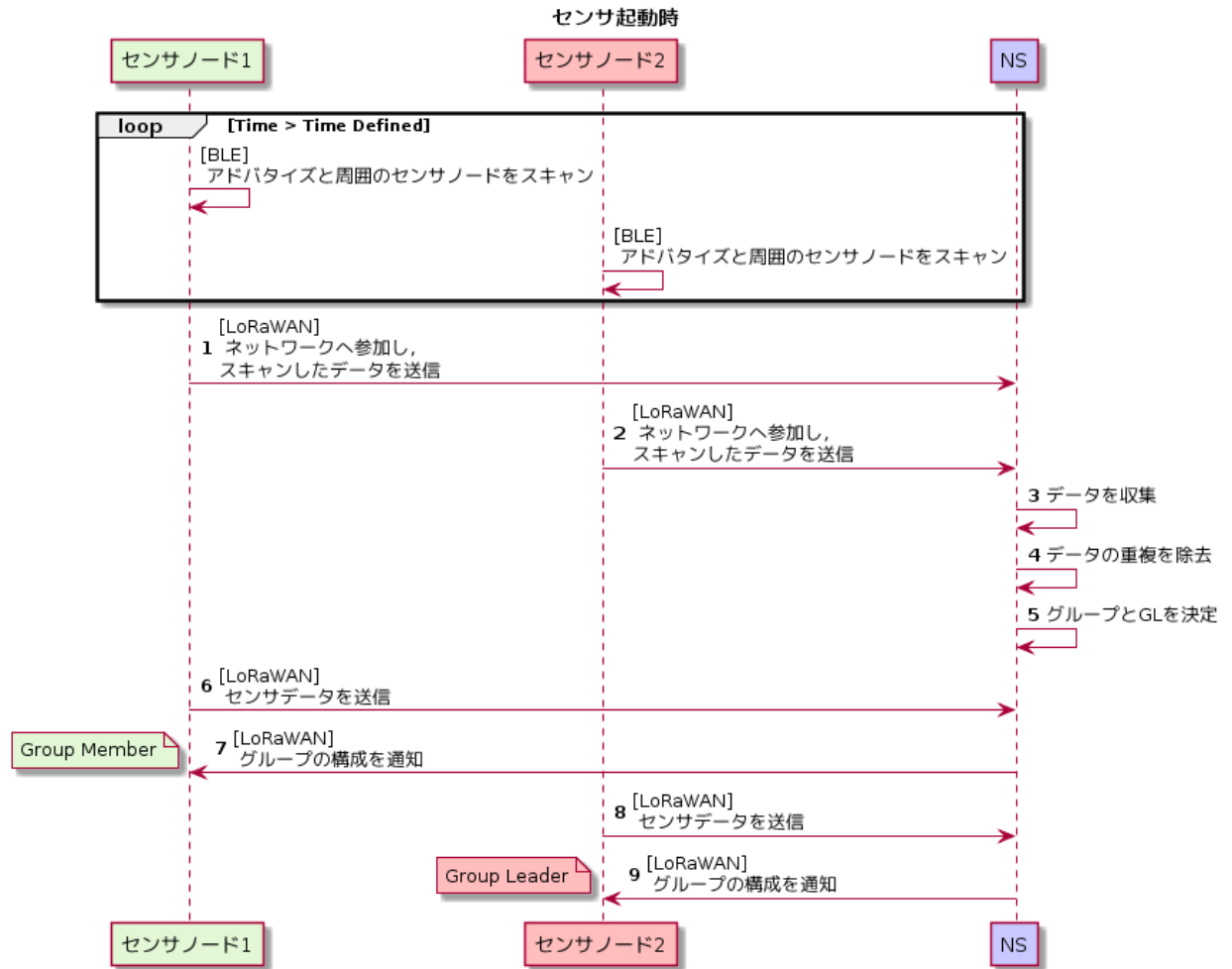


図 5.3 センサネットワーク展開時のグループ化の通信方式

5.2.5 センサノードの参加・離脱時の振る舞い

研究課題 4.2 のグループを作成する際に、いくつかのセンサノードの増減が考慮されていない課題を解決するため、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 5.5 参照）を示す。

1. 前項で述べたスリープ時の通信挙動により、新規センサノードは、起動時に BLE にて周囲の参加可能なグループを探索する。
2. 参加先を発見した場合は、そのグループに参加する（図 5.5 シーケンス 2-3 番号参照）。
3. そうでない場合は LoRaWAN にてセンサデータを送信し GW ノードからグループの通知を受ける。グループの参加先がない場合は、LoRaWAN にてセンサデータを送信する（図 5.5 シーケンス番号 2-5 参照）。

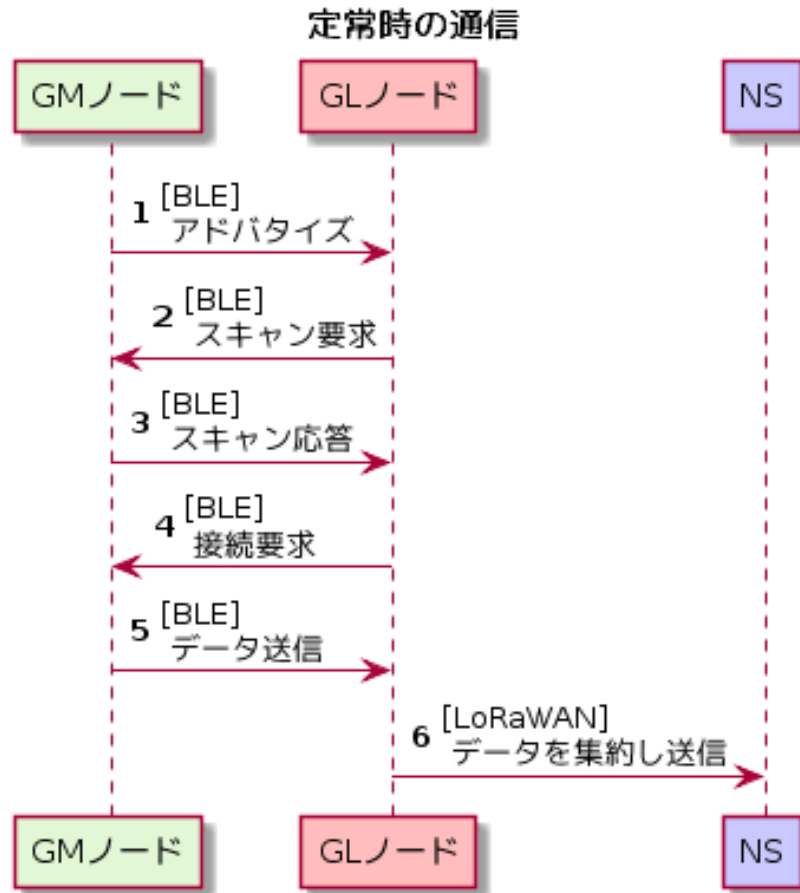


図 5.4 定常時のグループ化の通信

後者について、下記にシーケンス（図 5.6 参照）を示す。

1. ノードが停止する（図 5.6 シーケンス 1 参照）。
2. ノードが故障や電池切れで離脱する場合は、GL ノードがデータが欠損した状態で送信する（図 5.6 シーケンス 2-3 参照）。
3. NS がデバイスを管理しているので、一定期間、センサデータが GW ノードに届かなかった際に、グループリストからセンサノードを取り除く（図 5.6 シーケンス 4 参照）。
4. 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（図 5.6 シーケンス 5 参照）。

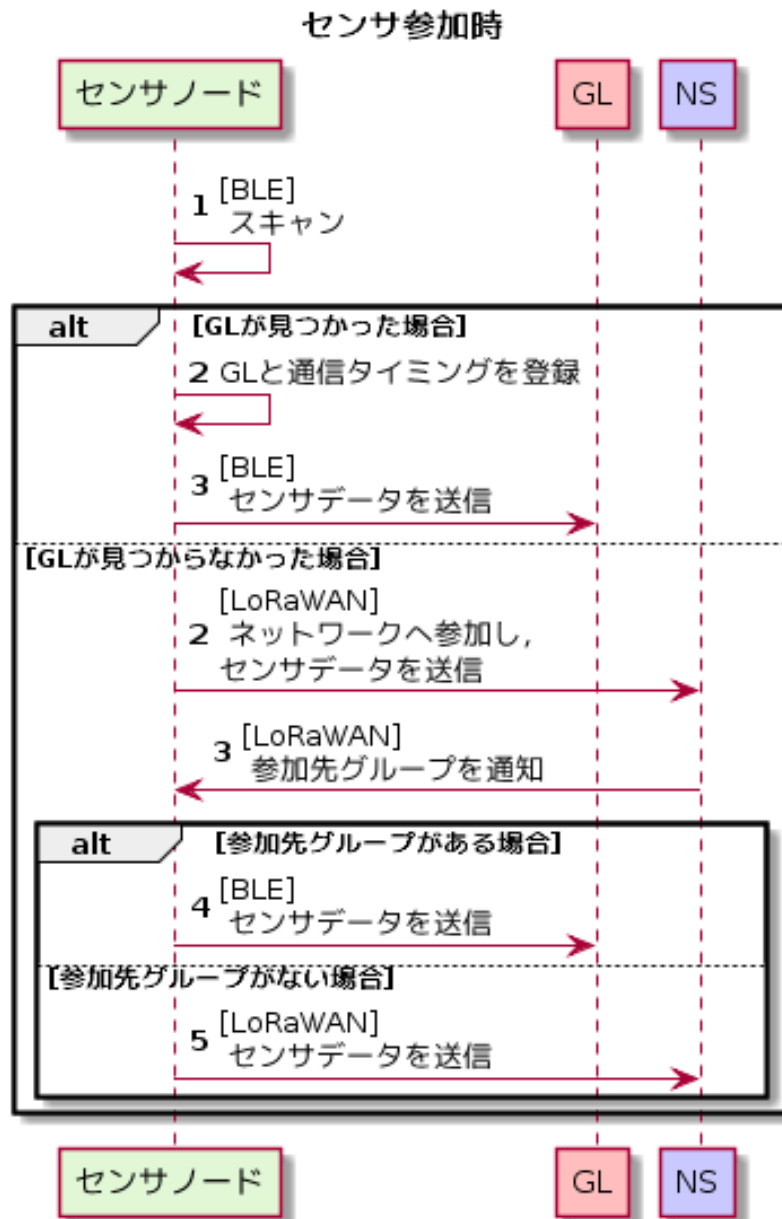


図 5.5 ネットワーク参加時の振る舞い

5.3 センサノードグループ再構成のアプローチ

5.3.1 自律型再グループ化

研究課題 4.3 における，集約ノードの消費電力負担が増加する課題を解決するため，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

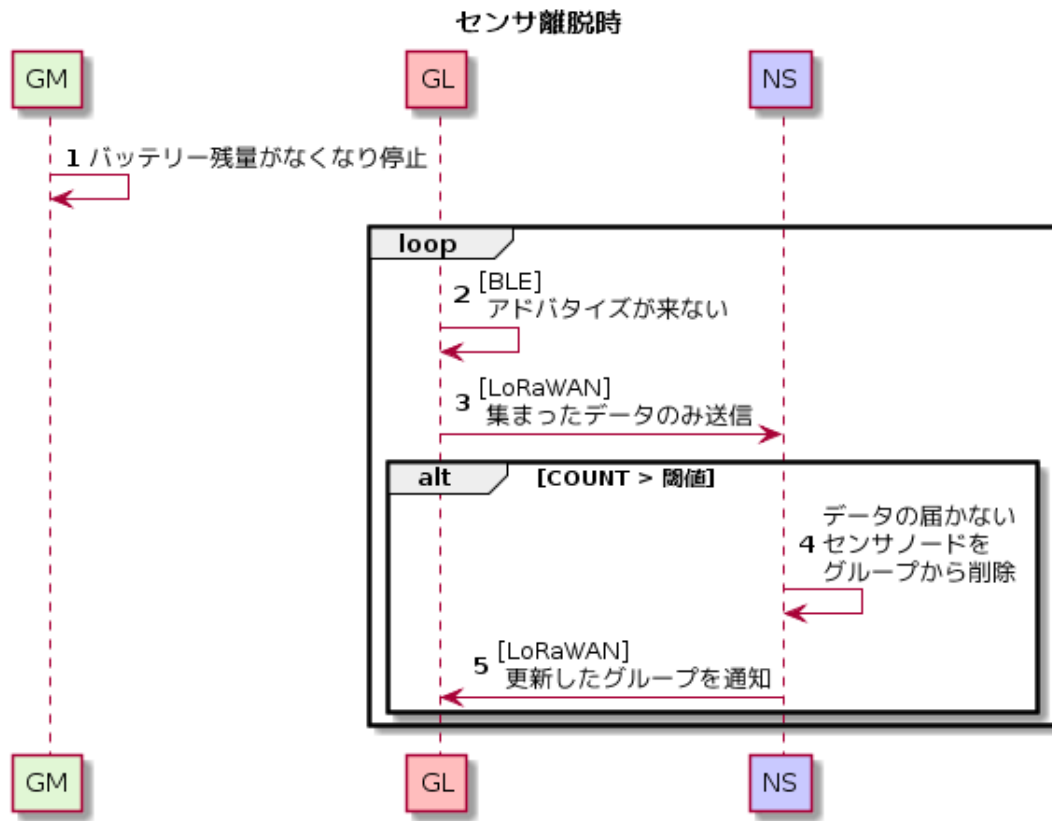


図 5.6 ネットワーク離脱時の振る舞い

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 5.7 参照）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、通信回数をデータに載せる（図 5.7 シーケンス番号 1-2 参照）。
2. GL ノードは GM ノードの消費電力量を見積もり、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（図 5.7 シーケンス番号 3 参照）。
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 ノードのサービス UUID を通知する（図 5.7 シーケンス番号 4-5 参照）。
4. その後、データを集約し GW ノードへ送信する（図 5.7 シーケンス番号 6 参照）。

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。

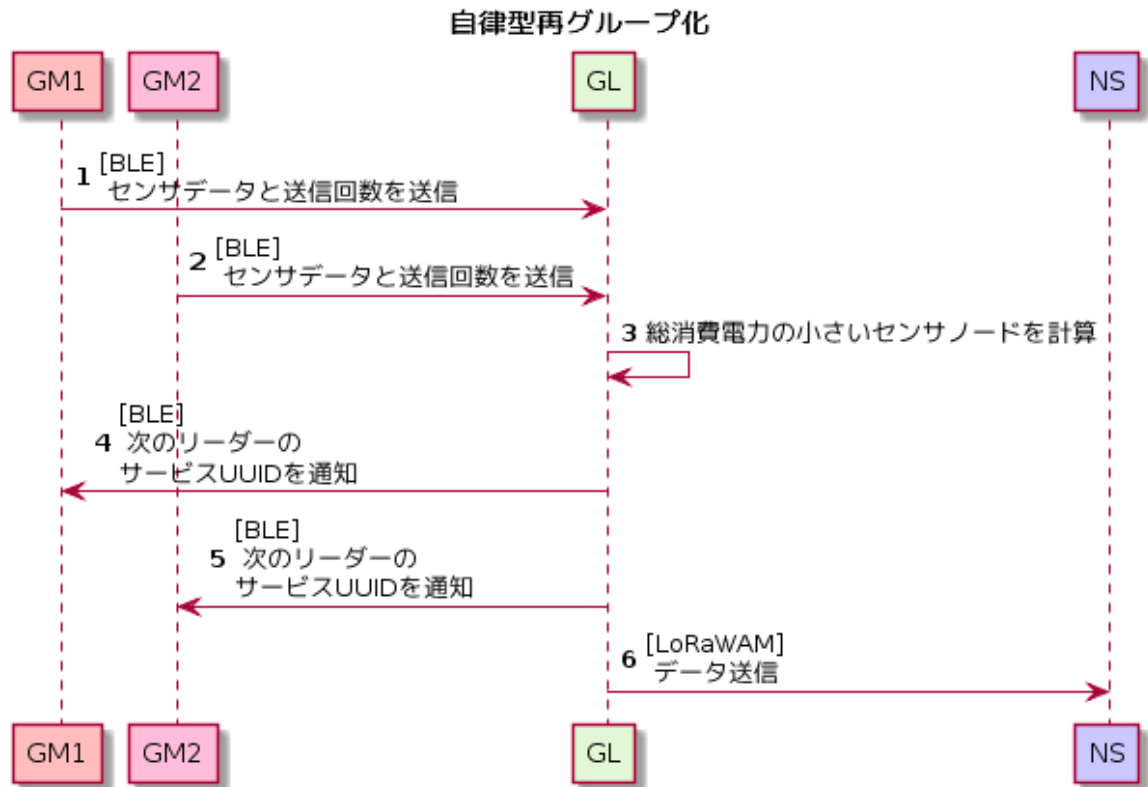


図 5.7 自律型再グループ化

5.3.2 集中型再グループ化

提案手法では、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、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。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（図 5.8 参照）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（図 5.8 シーケンス番号 1 参照）。
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しグループを再構成する（図 5.8 シーケンス番号 2-3 参照）。
3. GW ノードは、グループを再構成した際に再構成があれば通知する（図 5.8 シーケンス番号 4 参照）。
4. GL ノードは、GM ノードに新しいリーダーのサービス UUID を通知する。

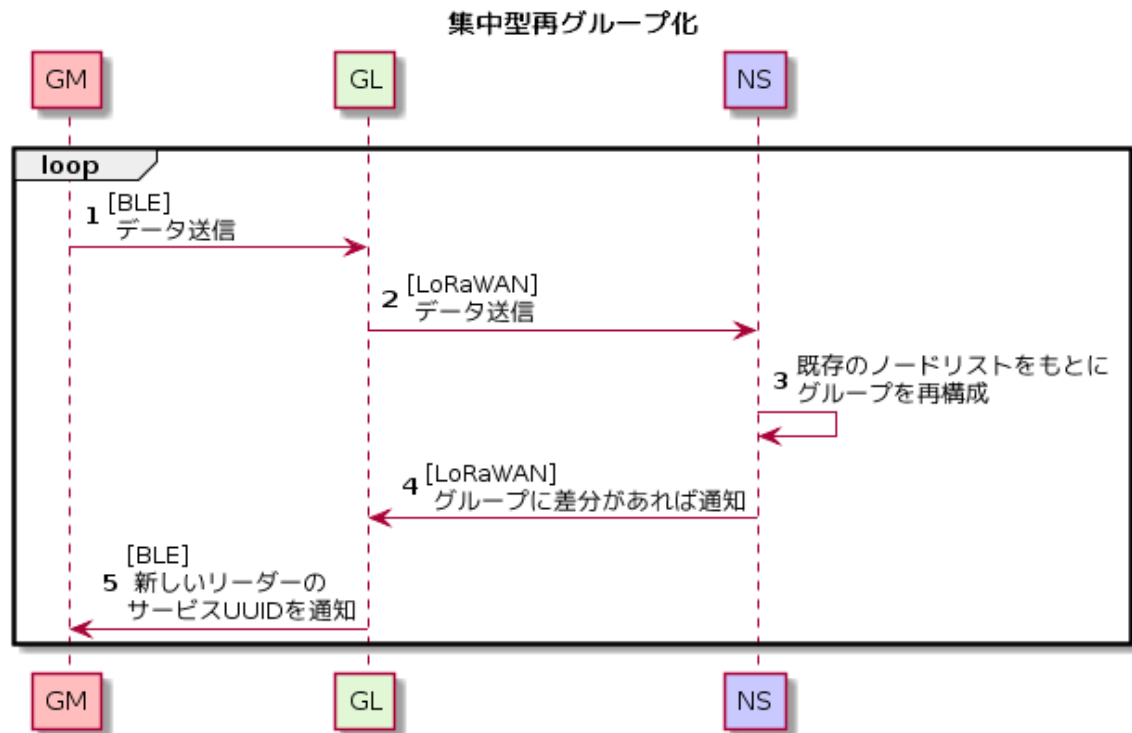


図 5.8 集中型再グループ化

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。

第 6 章

実測に基づくグループ化アルゴリズムの適応点の評価

6.1 実験目的

前項 5.1.3（グループ化アルゴリズムの適応点の検討）で述べたように，グループ化の適応点を明らかにするため，LoRaWAN における消費電力の実測を行う．適応点の評価については，前述した LoRaWAN の既存方式と提案手法における関係式 5.3 に，実測した値を代入することで判断する．

6.2 実験方法

提案システムにおける各シーケンスにおいて消費電力を求めるため，起動からネットワーク参加，起動からネットワーク参加・初回送信，定常時の送信，スリープとイベントごと消費電力を計測する必要がある．実験では，市販の Arduino 互換 LoRaWAN モジュール及び消費電力計を用いて，消費電力を計測した．実験環境は，下記の表に示す．実験機材は，LoRaWAN の送信機に，シングルボードコンピュータである Arduino Uno R3（表 6.1 参照），LoRaWAN Shield for Arduino[7]（表 6.2 参照），受信機に LoRaWAN Gateway[8]（表 6.4），消費電力測定にマルチメータ [9]（表 6.3 参照）を用いた．LoRaWAN は長距離伝送がユースケースであるため，LoRaWAN のノードと GW ノードを，高低差があり，約 3.5 km の距離がある公立はこだて未来大学と自宅間に配置した．また計測結果を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 の設定内容を述べる．前述した LoRaWAN の ADR 機能を適応し，スリープ時間は 4 秒とした．30 秒間の計測を 4 セット 12 試行した．パケット到達率を算出するため，データ受信を確認する必要がある．本実測で利用した LoRaWAN モジュールのプロバイダーは，MQTT ブローカーが提供しているため，MQTT クライアント [10] を用いてデータを取得した．下記（図 6.2 参照）は，実験の様子である．

表 6.1 ARDUINO UNO REV3

動作電圧	5V
DC 電流	50mA
フラッシュメモリ	32KB
SRAM	2KB
EEPROM	1KB

表 6.2 LoRaWAN Shield for Arduino

電源電圧	DC2.2 ~3.6V
周波数	920.6MHz ~928MHz
動作温度	0° C ~40° C
サイズ	68mm × 53mm × 22.8mm
無線規格	LoRaWAN 1.0.2

表 6.3 Kotomi Premium

サイズ	77 x 35 x 13mm
ディスプレイ	1.44 インチ
電圧精度	0.0001V
電流制度	0.0001A
電圧範囲	3.7~25V
電流範囲	0~5A

表 6.4 LoRaWAN Gateway

モデル名	SW-GW01
チャンネル数	最大 8ch
Wireless LAN	802.11 b/g/n 2.4G
送信出力	20mW (最大 13 dBm)
受信感度	Down to -142 dBm
動作温度	-10°C ~55°C
電源電圧	DC 5V / 2A (ミニ USB ポート経由)
インターフェース	Ethernet x 1 ポート, 3/4G USB ドングル
サイズ	L:116 x W:91 x H:27 mm
重量	160g



図 6.1 MQTT Client



図 6.2 実測実験の様子

表 6.5 実測に用いた電源

サイズ	72 x 70 x 31 (mm)
重量	189g
バッテリー容量	5000mAh
入力	5V=2A
出力	5V=3A

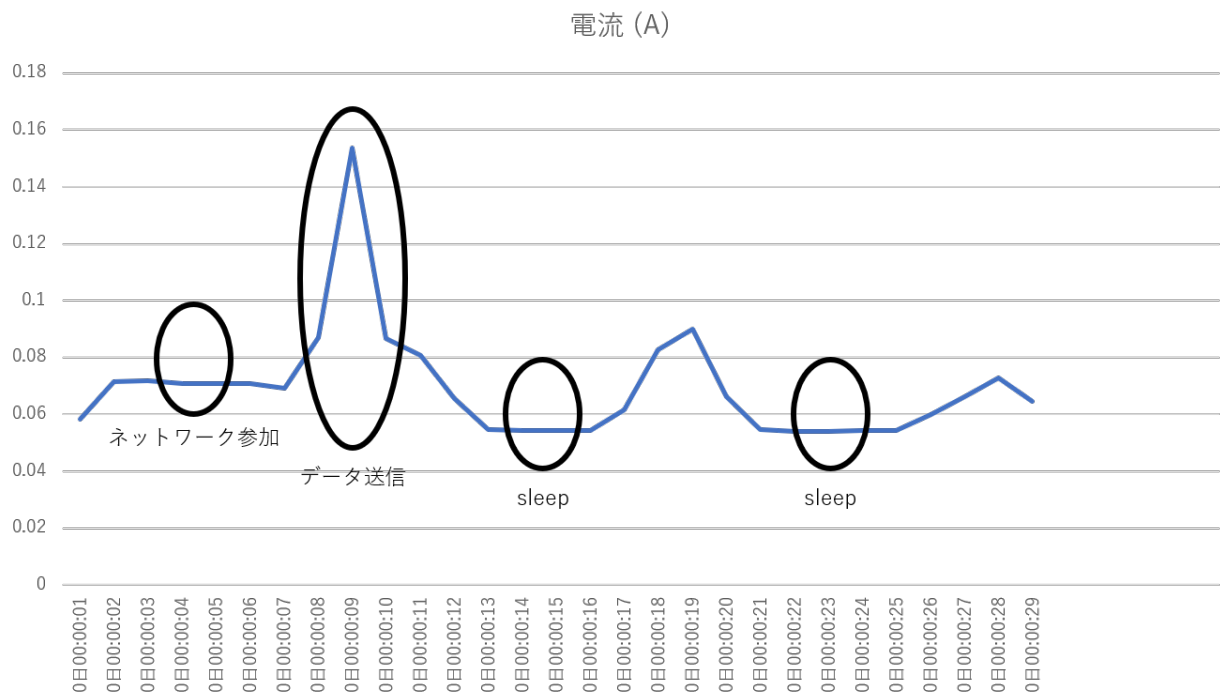


図 6.3 消費電力測定における各イベント（縦軸：消費電流，横軸：時間（s））

6.3 実験結果

LoRaWAN (DR2) でのイベントごとの消費電力実測結果を下記（表 6.3 参照）（表 6.6 参照）に示す。また，LoRaWAN (DR2) でのその他値を下記（表 6.7 参照）に示す。パケット到達率は，LoRaWAN の送信回数に対して MQTT ブローカーで受信したデータ数をもとに算出した。RSSI は，LoRaWAN の GW ノードが収集し MQTT ブローカーに送信するため，その値を参考とした。SNR も同様である。

表 6.6 イベントごとの消費電力

イベント	時間 (second)	電流 (mA)	消費電力 (mW)
起動→ネットワーク参加	7	20	120
起動→ネットワーク参加→データ送信	11	21	105
スリープ	なし	3	15
データ送信	4	29	145

表 6.7 その他パラメータ

パラメータ	値
パケット到達率	90%
RSSI	-102
SNR	-10

第 7 章

考察

7.1 グループ化の適応点について

3.1 と 6.6 のデータを比較すると，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．実測により，5.3 を用いて，LoRaWAN の既存方式とグループ化において，グループ化が消費電力の観点で優位であるか算出することが可能となる．実験の実測値 6.6 と文献の Cypress の参考値 3.1 を 5.3 に代入する．結果として 1 送信/分において，提案手法を用いた場合，グループ内の再送を考慮すると 1 台あたり約 112mW から 89mW の消費電力削減効果が見込めると考える．従って，消費電力の観点では提案手法は有効であると言える．しかし，実測によりグループ化の適応点については考慮しなければならない項目が増えると考ええる．6.7 に示したように，3.5km という区間を LoRaWAN（DR2）で通信した場合，パケット到達率は 90 %であった．ここで，2.2 で述べたように DR 値は 7 段階あるが，市販のセンサノードが利用できたのは DR2 からであった．つまり，長距離伝送において DR が最も低い値を用いても，100 %の到達率にならないのである．今回の実測で取得したパラメーターのうちパケット到達率，DR，RSSI，SNR がセンサノードと GW の距離を変えた場合に変化が起きるかを調査し，パケット到達率を定式化することにより，詳細な消費電力を求められると考える．

第 8 章

まとめと今後の方針

8.1 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。提案手法が、LoRaWAN の既存方式に対して有効であるか判断するため、既存方式及び提案手法のモデル式を定義した。後にモデル式の変数を満たすため消費電力の実測を行った。結果として、BLE の方が LoRaWAN に対して消費電力が大きく少ないことが分かった。グループ化手法の適応点を示す式に代入した結果、グループ化を用いた場合のほうが、90mW 程削減可能なことが分かった。また実験の際、デバイスを固定していたが LoRaWAN のパケット到達率が 100 % とならなかったことから環境要因によって左右される可能性が分かった。

8.2 今後の方針

本研究では、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ける平均通信時間、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] 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.
- [4] 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->.
- [5] 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.
- [6] Power consumption analysis of bluetooth low energy commercial products and their implications for IoT applications. *Electronics (Switzerland)*, 7(12), 2018.
- [7] LoRaWAN Shield for Arduino. <https://www.switch-science.com/catalog/3924/>.
- [8] LoRaWAN Gateway. <https://www.senseway.net/service/network-service/rental-gateway-service/>.
- [9] Kotomi Premium. https://store.avhzy.com/index.php?route=product/product&product_id=50.
- [10] MQTTTool. <https://apps.apple.com/us/app/mqtttool/id1085976398>.
- [11] Mattia Rizzi, Alessandro Depari, Paolo Ferrari, Alessandra Flammini, Stefano Ri-

- naldi, and Emiliano Sisinni. Synchronization Uncertainty Versus Power Efficiency in LoRaWAN Networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(4):1101–1111, 2019.
- [12] LoRaWAN を牽引する「LoRa」の概要と利用動向. https://www.soumu.go.jp/main_content/000450875.pdf.
- [13] Bluetooth 4.0: Low Energy. <https://californiaconsultants.org/wp-content/uploads/2014/05/CNSV-1205-Decuir.pdf>.
- [14] Muying Chen and Koichi Adachi. LoRaWAN Spreading Factor Selection Method for Multiple Gateways Reception in LoRaWAN. pages 125–130, 2019.

付録

.1 利用したソースコード

1. askn37/LoRaWAN_TLM922S https://github.com/askn37/LoRaWAN_TLM922S

図目次

2.1	BLE の通信フロー	6
5.1	グループ化のトポロジ	13
5.2	スリープ時のグループ化の通信方式	13
5.3	センサネットワーク展開時のグループ化の通信方式	15
5.4	定常時のグループ化の通信	16
5.5	ネットワーク参加時の振る舞い	17
5.6	ネットワーク離脱時の振る舞い	18
5.7	自律型再グループ化	19
5.8	集中型再グループ化	20
6.1	MQTT Client	23
6.2	実測実験の様子	23
6.3	消費電力測定における各イベント（縦軸：消費電流，横軸：時間（s））	24

表目次

2.1	LoRaWAN のクラス	4
2.2	LoRaWAN の DR	4
2.3	LoRaWAN のユースケース	4
2.4	LE packet structure	6
2.5	Advertising Channel PDU	6
3.1	消費電力	8
5.1	モデル式のパラメーター	12
6.1	ARDUINO UNO REV3	22
6.2	LoRaWAN Shield for Arduino	22
6.3	Kotomi Premium	22
6.4	LoRaWAN Gateway	22
6.5	実測に用いた電源	24
6.6	イベントごとの消費電力	25
6.7	その他パラメータ	25