

【平成29年度JKA機械振興補助事業】

「IoT 社会進展に向けた新たな省電力無線メッシュネット

ワークの適用可能性調査研究」研究委員会

(通称：JKA省電力無線メッシュネット研究委員会)

報告書

平成30年3月

一般財団法人 ニューメディア開発協会



競輪の補助事業

本研究は競輪の補助を受けて実施しました。
<http://hojo.keirin-autorace.or.jp>

目次

1. はじめに	1
2. JKA省電力無線メッシュネットワーク研究委員会	2
2.1. 研究会構成委員	2
2.2. 研究委員会の進め方	3
3. IoT 応用アプリケーションの適用想定シナリオにおけるニーズ	3
3.1. 想定適用シナリオ1「屋内における人や物の位置の推定」	3
(1) ニーズ概要	3
(2) ニーズ詳細	3
(3) 課題	4
3.2. 想定適用シナリオ2「太陽光発電モジュール管理」	4
(1) ニーズ概要	4
(2) ニーズ詳細	4
(3) 課題	4
3.3. 想定適用シナリオ3「屋外、外構などの照明システムの遠隔操作」	5
(1) ニーズ概要	5
(2) ニーズ詳細	5
(3) 課題	5
3.4. 想定適用シナリオ4「空間のアドホック・テンポラリなセンシング」	5
(1) ニーズ概要	5
(2) ニーズ詳細	5
(3) 課題	5
3.5. 想定適用シナリオ3「公共インフラの維持管理」	6
(1) ニーズ概要	6
(2) ニーズ詳細	6
(3) 課題	7
3.6. 想定適用シナリオ6「土木工事及び建設工事現場での重機等による接触事故防 止と危険告知」	7
(1) ニーズ概要	7
(2) ニーズ詳細	7
(3) 課題	7

4.	省電力無線ネットワーク技術	7
4.1.	省電力無線ネットワークのデータ転送技術	8
	(1) Bluetooth Low Energy (BLE)	8
	(2) IEEE802.15.4 (ZigBee, SUN)	14
	(3) LPWA	19
4.2.	無線デバイスの位置推定技術	22
	(1) Range-based 方式	23
	(2) Range-free 方式	24
	(3) その他の電波を用いた位置推定方式	25
5.	省電力無線メッシュネットワークの適用可能性と課題	26
5.1.	データ転送に関する要件と課題	26
	(1) 想定適用シナリオ1「屋内における人や物の位置の推定」	26
	(2) 想定適用シナリオ2「太陽光発電モジュール管理」	27
	(3) 想定適用シナリオ3「屋外、外構などの照明システムの遠隔操作」	28
	(4) 想定適用シナリオ4「空間のアドホック・テンポラリなセンシング」	28
	(5) 想定適用シナリオ5「公共インフラの維持管理」	28
	(6) 想定適用シナリオ6「土木工事および建設現場での重機等による接触事故防止」	28
5.2.	無線デバイスの位置推定に関する要件と課題	29
	(1) 想定適用シナリオ1「屋内における人や物の位置の推定」	29
	(2) 想定適用シナリオ2「太陽光発電モジュール管理」	29
	(3) 想定適用シナリオ3「屋外、外構などの照明システムの遠隔操作」	29
	(4) 想定適用シナリオ4「空間のアドホック・テンポラリなセンシング」	29
	(5) 想定適用シナリオ5「公共インフラの維持管理」	29
	(6) 想定適用シナリオ6「土木工事および建設現場での重機等による接触事故防止」	29
6.	課題とまとめ	29

JKA平成29年度機械振興補助事業
「IoT社会進展に向けた新たな省電力無線メッシュネットワークの適用可能性調査研究」
研究委員会
(通称：JKA省電力無線メッシュネットワーク研究委員会)
報告書

JKA 省電力無線メッシュネットワーク研究委員会 委員長
滝沢 泰久

1. はじめに

近年、Internet-of-Things(IoT)、BigData、AI（人工知能）による新たな情報通信処理フレームワークの進化と社会への浸透は顕著であり、この進化と浸透は仕事のあり方や生活のあり方を変えつつあり、産業構造や社会構造を変革する可能性を有している。このような新たな情報通信処理フレームワークにおいて、IoTは、膨大な数の小型センサデバイスやスマートデバイスを、商業活動、生産活動、医療活動などの社会の多様な活動環境や人に配置または装備して、これらデバイスから得られた情報をインターネットへ集約し、これを知識ベースとしてBigDataを作り出す神経系として機能する。すなわち、IoTは新たな情報通信処理フレームワークの根底を支える技術である。

IoTの基本部分を構成するのは、膨大な数の小型センサデバイスやスマートデバイスである。この小型センサデバイスやスマートデバイスの要件として、数を必要とするため低コストであること、バッテリー駆動であるためそのライフタイムを伸ばすため省電力であることが求められる。従って、これら小型デバイスは通信デバイスとしてWiFiやLTEのような広帯域・高出力可能なデバイスは利用できないため、ZigBee (IEEE802.15.4) やBLE (Bluetooth Low Energy) などの省電力デバイスを用いることとなり、インターネットのエッジまでのネットワークは省電力無線デバイスを用いた多数の小型センサデバイスまたはスマートデバイスによる無線メッシュネットワークが想定されている。無線メッシュネットワークはその柔軟性から応用利用が期待されて久しいが、その利用が普及していると言い難い。すなわち、現状の無線メッシュネットワークは応用利用においてユーザのネットワークに対する要件を満たせていないと考えられる。一方で、LPWA(Low Power Wide Area)無線デバイスがIoTデバイスとして注目されている。LPWAは省電力無線デバイスでありながら、広域通信を可能とし、インターネットとの接続においてメッシュネットワーク

の構成を必要としない。以上の背景から、IoT 環境において無線メッシュネットワークの必要性やその適用可能性について再考する必要があると考える。

本報告書は、前述の省電力無線ネットワークの取り巻く環境において、JKA省電力無線メッシュネットワーク研究委員会が、「IoT 社会の進展における省電力無線メッシュネットワーク技術の必要性と適用可能性を検討し、その要件と課題を明確にする」ことを目的とした議論結果を報告するものである。

以降、2 章にて研究会委員構成と研究会概要を示し、研究会で概論された IoT 応用アプリケーションの適用想定シナリオとその技術ニーズを 3 章に示し、この技術ニーズに関わる省電力無線ネットワークの技術動向を 4 章に示す。さらに、5 章にて 3 章と 4 章に基づいた IoT 社会の進展における省電力無線メッシュネットワーク技術の必要性と適用可能性を示す。

2. JKA省電力無線メッシュネットワーク研究委員会

2.1. 研究会構成委員

本研究委員会は、「IoT 社会の進展における省電力無線メッシュネットワーク技術の必要性と適用可能性を検討し、その要件と課題を明確にする」ことを目的とする。本研究委員会の構成は、本目的を達成させるために、省電力無線メッシュネットワークの専門技術者と IoT 応用利用を検討する技術者から構成した。以下に本研究委員会委員構成を示す。

委員長

関西大学 環境都市工学部 滝沢泰久

委員

ジーワン株式会社 取締役 小森 義浩

ジーワン株式会社 開発事業部 加藤 周平

株式会社 竹中工務店 技術研究所 高井 勇志

株式会社 竹中工務店 情報エンジニアリング本部 粕谷 貴司

アイセイ株式会社 代表取締役 岩佐 宏一

合同会社パワープラント 代表 飯塚 徹

技術アドバイザー 袴田 一樹

ホシデン株式会社 大阪営業統括部 辻本 治

有限会社デジタルウィンド 代表 斎藤 隆司

オブザーバー

技術アドバイザー 久島 信幸

ジーワン株式会社 リップルライト事業部 永井 亮平

ホシデン株式会社 大阪営業統括部 平田 吉良

2.2. 研究委員会の進め方

現状の省電力無線メッシュネットワーク技術（シーズ提供側からの説明）の把握を行い、研究委員会全体において議論するプラットフォームの構築を図った。その後、想定ターゲットでの IoT 応用アプリケーションとそれを支える無線ネットワークの要件（ニーズ提供側からの説明）から、省電力無線メッシュネットワークの適用可能性を議論した。その結果として、適用への課題を明確した。以下に研究会開催日時とその概要を示す。

第1回研究委員会

日時 2017年7月14日 13:00～16:30

場所 一般財団法人 ニューメディア開発協会

概要 シーズ面の現状及び課題の報告

第2回研究委員会

日時 2017年9月21日 13:00～16:30

場所 一般財団法人 ニューメディア開発協会

概要 ニーズ側における動向について説明

第3回研究委員会

日時 2018年12月14日 13:30～15:30

場所 一般財団法人 ニューメディア開発協会

概要 省電力無線メッシュネットワークの適用可能性と課題の抽出

第4回研究委員会

日時 2018年3月13日 15:00～17:00

場所 一般財団法人 ニューメディア開発協会

概要 省電力無線メッシュネットワークの課題の提言

3. IoT 応用アプリケーションの適用想定シナリオにおけるニーズ

本章では、研究会委員から説明されて IoT 応用アプリケーションの適用想定シナリオにおける技術ニーズを示す。

3.1. 想定適用シナリオ1「屋内における人や物の位置の推定」

(1) ニーズ概要

オフィスなど屋内で人や物がどの辺りにあるのかを推定する技術。

(2) ニーズ詳細

これからの働き方改革の一環として、ABW(Activity Based Working)という考え方が進められており、従来の固定席に縛られず、職務の内容や活動に応じて自由に移動して働くことが広まってくると考えられる。そこで、オフィス内で誰がどのあたりにいるのか、という情報を得る方法が求められる。加えて、移動可能な什器や機器にもセンサーを取り付け、人だけでなくオフィス内の様々なものの動きが取れると、管理上も役立つのに加えて、空間の使われ方の研究にも使うことができる。

(3) 課題

省電力で、小型、人が携帯容易および物へ装備容易であるデバイスが必須である。既存のPCやプリンタなどの機器に接続可能であることも必要である。位置推定精度は数m程度で十分である。位置更新頻度は人の場合分単位、物の場合時間単位と考える。無線LAN、ビーコンなど既存無線技術による無線デバイスの多数の位置推定システムがあるが、これらのメリットやデメリットを明確にする必要がある。可能であれば、位置推定のための無線デバイスの設置や変更にかかるコストがかからない技術が望まれる。この点が可能であれば、ビルなどの施工現場における作業員や建材の位置把握に利用可能である。

3.2. 想定適用シナリオ2「太陽光発電モジュール管理」

(1) ニーズ概要

太陽光パネルのストリング（系統）ごとの細かいモニタリングをすることで、性能劣化などをいち早く検知することができる。

(2) ニーズ詳細

太陽光パネルの故障検知などは、ドローンによる温度調査などが検討されている。しかし、ストリング（系統）ごとに細かく電流、電圧を計測することで性能劣化を素早く見つけることが求められている。例えば、系統内の1つのパネルが故障して電圧降下を起こしていた場合、系統全体がそれに引きずられて発電効率が落ちる事象がある。現状、監視装置を、LTEなどを介して運用しているが、それほどリアルタイム性は求められないので、メッシュネットワークが適用できる可能性があると考えられる。

(3) 課題

センサー情報を無線メッシュネットワークにより転送すること（無線センサネットワークの適用）が考えられる。しかし、無線メッシュネットワークはデータ欠損などの信頼性に課題があると考えられる。本シナリオにおいて、データの発生頻度は高くなく、データ量も多くない。このような条件において無線メッシ

ネットワークの信頼性を高める必要がある。

3.3. 想定適用シナリオ3「屋外、外構などの照明システムの遠隔操作」

(1) ニーズ概要

屋外、外構などの照明機器に対しての調光制御のための通信インフラ。

(2) ニーズ詳細

建物設備（100m × 100m 程度の大きさ、例えば大ホールや駐車場）設計において、屋外や外構などにおいて電源配線は必須である。一方で LAN 配線が難しい場合が多い。理由としては、一般的にノイズ等の理由で電源と LAN ケーブルを平行に施工することは一般的に実施しない。また、意匠や管理の理由から外構や建物屋根などに配管を通すのは、1 本程度に収めたい要求がある。さらに、LAN ケーブルの敷設は 100m 制限があるため、それらを伸ばす場合はスイッチなどが必要となり、その機器のメンテナンスや設置場所が課題になる。従って、LAN ケーブル配線を排除するため、無線メッシュネットワークを構成して、このネットワークにより照明機器を制御する。

(2) 課題

照明機器をアクチュエータとして無線メッシュネットワークを構成して、リアルタイムの調光制御などを手元の携帯端末などで制御することが考えられる。しかし、リアルタイムな制御を想定した無線メッシュネットワークに対応したプロダクトが多くないのが課題と考える。

3.4. 想定適用シナリオ4「空間のアドホック・テンポラリなセンシング」

(1) ニーズ概要

オフィスや工場など、将来的にレイアウトの変更が予想される空間には、固定的なセンサーが設置しにくい。機動的なセンサネットワークの構成とセンサー位置の推定する技術がニーズとしてある。

(2) ニーズ詳細

オフィス内の温湿度計測などをテンポラリーに行いたいというニーズがあり、その情報を使ってより快適な空調制御などを検討する要求がある。一般的なソリューションであると、無線センサノードに対してゲートウェイ機器で情報を収集するが、その設置自体がハードルになる場合がある（電源などが必要なため）。恒常的な設備を用いずに、各ノードが電池などで駆動し、自律的なネットワークを構成し、かつセンサノード位置を推定する技術が必要である。

(3) 課題

沖電気社などがマルチホップのセンシングソリューションを発売しているが、

センサーなどが高額である。一方で EnOcean、Bluetooth などのスマートデバイスは低価格化が進んできている。低価格な Bluetooth デバイスによる無線メッシュネットワークの構成とこれらデバイスの位置推定の技術が必要である。

3.5. 想定適用シナリオ3「公共インフラの維持管理」

(1) ニーズ概要

公共インフラは放置すると劣化し、第三者への影響に加え社会経済への損失につながるため、国は維持管理のための法制度を整え施行した（5年に1回の点検を義務化）。しかし、予算がなく技術者もいない多くの自治体は「見なければならぬ構造物への対応義務」、「直さなければならぬ構造物への対応義務」への大きな課題が顕在化した。点検の自動化と点検結果による保守の最適化は必須である。また、防災や災害時の対策において確実な情報提供が必要であるが、未だ構築されていない状況である。

(2) ニーズ詳細

維持管理：

橋梁、トンネル等の定期点検を実施する5年の間を補えるモニタリング技術において、センシングは、たわみ、傾斜、ひずみ等物理センサーや環境要因を観測するケミカルセンサーにより実施する。一方、取得センシングデータの転送は、現状各々のセンサーが有線で接続されたネットワークにより実施している。このシステムはセンサー間が遠ければ遠いほど有線ケーブルの引きまわしが煩雑になるため、(必要なデータを確実に捉えられなくても) 小さな範囲に収めるか、または費用をかけて大きな範囲で計測する必要がある。これらの課題を省電力メッシュネットワークにより、広範囲でかつ安価で構成することが可能とすることが期待される。

防災：

防災の観点から予兆や余寿命が評価できる技術において、センサーによるモニタリングにより危険を予測することが期待される。また、災害時にダウンしないネットワークの構築（緊急輸送道路、避難経路の情報発信）が求められる。維持管理は構造物を単体としたミクロ的な観点であり、災害時は地域（エリア）の安全性能が求められる。この場合ひとつのセンサーが途絶えたとしても他のセンサーをたどって通信網を構築できる耐故障性の高いネットワークが必要である。さらに、橋梁の段差により、車両の通行が困難となる場合や河川増水による決壊の恐れ、また自然斜面における表層崩壊等の把握は広域な面的情報が必要となるため、インフラネットワークに依存しないメッシュネットワークを

構築することで災害情報の途絶えない提供が可能とすることが求められる。

(3) 課題

技術的および制度的な課題を以下に示す。

- インフラメンテナンスにおける点検の法制化（義務化）
- 元々あまり費用計上がないメンテナンス費が今後増大する
- 管理者の職員減少における、メンテナンスに対応できる技術者数
- メンテナンスにおける、劣化機構を熟知した技術者が少ない

3.6. 想定適用シナリオ6「土木工事及び建設工事現場での重機等による接触事故防止と危険告知」

(1) ニーズ概要

土木工事及び建設工事現場，特に建設における基礎工事，根伐工事等まだ躯体が立ち上がる前の現場状況において，工事区画内の敷地に高低差や窪み，掘削穴が多く，さらに，ユンボ等の重機やダンプトラック等，大きく重量のある物体の場内通行量が激しい．このような工期内建設現場において，現場作業員への危険告知を，即時性を保って伝達することにより，重大災害事故上位を占める車両・重機等による接触事故を撲滅するシステムの構築を，メッシュネットワークを活用することで達成することが期待される。

(2) ニーズ詳細

建設現場での事故発生によるコストロスは何億円単位であり，事故防止が旧来からの最大のテーマである．各作業員，車両・重機及び開口部などの危険ゾーン（転落事故につながる）にクライアントを配置し，相互の距離が危険に近づくことを，色や音を変え，バイブレーション機能などを併せて段階的に危険度を知らせる事が可能なシステムの構築が求められる。

現場作業詰所で従事している作業員及び場内・場外にある車両・重機をリアルタイムに位置情報を把握出来る事と共に接触の可能性が場内に高まっている場合の警報システムも併せて構築することが必要である。

車両・重機と作業員が危険距離に近づいたログ情報を収集し，これを分析することにより，場内動線及び誘導路の改善計画の高度化を図る。

(3) 課題

場内入場予定で場外待機中の車両等が近隣の迷惑になるケースも後を絶たず，交通障害になりうる事を回避するために，場外のクライアントを管理するための課題を抽出し，活用方法も併せて探りたい．場外は法的に管理責任などが場内とは異なり，車両等の個別運用責任，車両の運用事業所の管理責任に帰属す

と思われるので、これらが有効か否かも検討課題である。

トンネルや地下構造物の中，又は大きなコンクリート構造物の近くに於いても，精密な位置情報を導くための課題も探りたい。

場内等に階層化されている箇所がある場合，平面位置情報ではクライアントの位置情報が重なると思われるので，タテ軸方向での重複する位置情報を選別して把握する事が可能か検討したい。

4. 省電力無線ネットワーク技術

本章では，3章におけるIoT応用アプリケーションにおいて必要とされる技術ニーズの現状を説明する。3章におけるIoT応用アプリケーションにおいて必要とされる技術ニーズは，省電力無線ネットワークにおけるデータ転送と無線デバイスの位置推定に大別できる。

4.1. 省電力無線ネットワークのデータ転送技術

(1) Bluetooth Low Energy (BLE)

1999年にBluetooth 1.0がリリースされ，2002年にBluetooth 1.1がIEEE802委員会に提案され，IEEE802.15.1として承認された。Bluetooth 1.xの送信速度は1Mbpsであった。Bluetooth 1.xの仕様は現在し，Bluetooth BR(Basic Rate)と呼ばれている。Bluetoothは低消費電力，低コストの無線技術として登場し，高い期待があったが，無線センサネットワークに適用するには，省電力機能としては不十分であり，普及が進まなかった。そこで，省電力無線技術としてノキア社のWibree技術を取り入れて，2010年にBluetooth Low Energy (BLE)とするBluetooth 4.0がリリースされた。2013年にはBluetooth 4.1，2014年にはBluetooth 4.2，2016年にはBluetooth 5.0がそれぞれ発表されている。

Bluetooth 4.0以降は，Bluetooth 1.x，2.x，3.x(クラシックBluetooth)との後方互換がなく，新たな仕様規格であり，Bluetooth Smartと呼ばれる。クラシックBluetoothは2.4GhzのISMバンド(Industry Science Medical Band)を周波数帯として利用する。この周波数帯は，IEEE802.11，ZigBeeなど産業・科学・医療などの多様な機器により共同利用されているため，電波干渉が非常に高い。このため，Bluetoothでは，周波数ホッピング拡散技術(FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum)を採用している。FHSSは，一定のルールに基づき，短い周期で次々と利用する周波数チャンネルを変更する通信方式である。無線通信において，通信は常に発生するわけではなく，間欠的に発生し，通信が行われていない時間(隙間)が常にある。FHSSは，通信が行われない通信隙間を利用して，少量のデータ

を送受信する。これにより、ISMバンドでの電波干渉を避けてデータ通信を行う。クラシック Bluetooth における FHSS は次の2点において省電力化が困難であった。

- ネットワーク発見と参加

クラシック Bluetooth の FHSS は、79 チャンネル中の 32 チャンネルをネットワークへの参加に用いる。マスタノードはこの 32 チャンネルを 68 マイクロ秒で切り替えて、Inquiry パケット（ネットワークの情報）をブロードキャストする。従って、スレーブノードとしてネットワークに参加するためには、68 マイクロ秒の周期で切り替えられる 32 チャンネルをスキャンして Inquiry パケットを受信する必要があり、Inquiry パケットを受信するためには、32 チャンネルの探索のために数秒間連続してスキャンを行うことになる。そのために、ネットワークの発見に大きな電力消費が発生する。

- ネットワーク維持のための時刻同期

スレーブノードとしてネットワークに参加すると、FHSS のチャンネルホッピングの時刻同期が確立する。しかし、時間経過とともに、各ノードのクロック誤差が累積されるため、これを修正する必要がある。クラシック Bluetooth はタイム・スロットが 625 マイクロ秒であることから、10 マイクロ秒程度が誤差の許容範囲である。従って、時刻同期の修正のために常に時刻同期のための制御通信が必要となり、省電力には不利となる。

Bluetooth 4.0 以降 (BLE) は、クラシック Bluetooth より省電力化するため、送信距離を犠牲にして送信電力を抑制する。クラシック Bluetooth では 100 ミリ W であった送信出力を 10 ミリ W の 1/10 とした。一方、通信速度はクラシック Bluetooth の 1Mbps と同様であり、ZigBee の 4 倍である。通信速度が 4 倍であることで、送信時間が短くなるため省電力に有利となる。BLE は、クラシック Bluetooth と同様に、2.4GHz の ISM バンドを利用周波数としている。従って、利用周波数は電波干渉が非常に高いため、FHSS を用いている。クラシック Bluetooth の FHSS は、電波干渉への耐性を強化できたが、前述のように、そのために省電力化において不利となった。BLE では、FHSS における電波干渉の耐性を維持しつつ、省電力化を次の点において図っている。

- パケットの軽量化

BLE ではパケットヘッダーの簡略化し、また最大パケットサイズも 47 バイトに抑制した。このため、送受信時間が大幅に抑止され、省電力化が可能となる。パケットの 47 バイトへの軽量化と 1Mbps の送信レートにより、1 つのパケット送受信に要する時間は 328 マイクロ秒であり、非常に短い時間である。

- ネットワーク参加のためのチャンネル数

クラシック Bluetooth でのチャンネル数は 72 チャンネルであり、その 32 チャンネルをネットワーク接続用に用いている。一方、BLE でのチャンネル数は 40 チャンネルでそのうちの 3 チャンネルをアドバタイズチャンネルとして、ネットワーク参加用の専用チャンネルとしている。すなわち、大幅にネットワーク参加用のチャンネル数を減少させることにより、短時間にネットワークの発見を可能とした。クラシック Bluetooth ではネットワークの発見に要する時間が秒オーダーであるが、BLE はこれを数 10 ミリ秒に短縮し、省電力を可能とした。

- パッシブスキャン

クラシック Bluetooth では、マスタノードがビーコンパケットをネットワーク参加用の 32 チャンネルへ周期的にブロードキャストする。スレーブノードがネットワークに参加しマスタノードとの接続を確立するためには、このビーコンパケットを受信する必要がある。そのため、スレーブノードは秒オーダーのスキャンを必要とし、省電力に不利となる。BLE では、ネットワークの発見をマスタノード主導（アクティブスキャン）から、スレーブノード主導（パッシブスキャン）に変更している。パッシブスキャンはスレーブノードがアドバタイズチャンネルに自身のプレゼンスを周知するアドバタイズメントパケットを周期的に配信し、これを受信したマスタノードと接続を確立する。スレーブノードは、アドバタイズメントパケットの送信インターバル間はスループ状態へ遷移して省電力でき、クラシック Bluetooth では常時スキャンする場合と比較して、大幅に省電力化が可能となった。

- 緩やかな時刻同期

BLE の FHSS におけるチャンネルホッピング周期は、クラシック Bluetooth の FHSS の 625 マイクロ秒周期チャンネルホッピングとは大きく異なり、数ミリ秒としている。クラシック Bluetooth の FHSS は短い周期でチャンネルホッピングを行うため、マスタノードとスレーブノード通信が 1 タイム・スロット内で収まらず、複数のチャンネルに跨った通信が必要となる。そのために、制御パケットを用いた厳密な時刻同期を常時実施する必要があり、省電力を困難としている。一方、BLE のチャンネルホッピング周期は数ミリ秒であるため、マスタノードとスレーブノードの間の通信は、1 タイム・スロットに収まり、チャンネルを跨るための制御は不要である。また、チャンネルホッピング周期は数ミリ秒であるため、時刻同期に関する精度が大きく緩和されて、時刻同期の制御を大幅に削減できた。また、スレーブノードはマスタサーバからの周期的なポーリングにおいて、省

電力のために意図的に無視する周期として、スレーブ・レイテンシーが設けられており、アプリケーションのニーズに適応して省電力することが可能である。

- 非ペアリング通信

BLE では、マスタノードとスレーブノード間において未接続状態でのデータ通信を可能としている。スレーブノードはアドバタイズメントパケットにデータを付加することにより、マスタノードへデータ送信が可能である。アドバタイズメントパケットはアドバタイズチャンネルを用いてブロードキャスト通信により行われるため、時刻同期が不要であり、省電力な通信を可能とする。

- プッシュ型通信

クラシック Bluetooth はマスタノードとスレーブノードとの通信はプル型通信である。プル型通信ではマスタノードからスレーブノードへデータ通信の要求の問い合わせを行い、これにスレーブノードが応答後に、データ通信の手順へ遷移する。BLE は、これをプッシュ型通信としている。プッシュ型通信は、通信前の手続きを省略し、直ちにデータ通信処理に入る。これにより、クラシック Bluetooth では、マスタノードとスレーブノード間とデータ交換に 4 往復の通信が必要であったが、BLE では 2 往復となり 1/2 の通量に削減した。

- 専用 ACK パケットの排除

クラシック Bluetooth では、データ受信の応答確認のために、データパケットと独立に、専用 ACK パケットを送信する。BLE では、専用 ACK パケットを用いずに、データパケット内のヘッダーにデータ受信の確認応答に関する情報を埋め込んでいる。これにより、制御パケットを抑制し、送信回数を抑え、省電力化を図っている。

BLE のアーキテクチャは、コア規格とアプリケーション個別のプロファイルに分けられる (図 1)。さらに、コア規格は、下位層のコントローラと上位層のホストに分けられ、コントローラとホストとのインターフェイスは HCI (Host Controller Interface) インターフェイスとして規定されている。HCI は UART, USB, SDIO の標準インターフェイスを用いている。

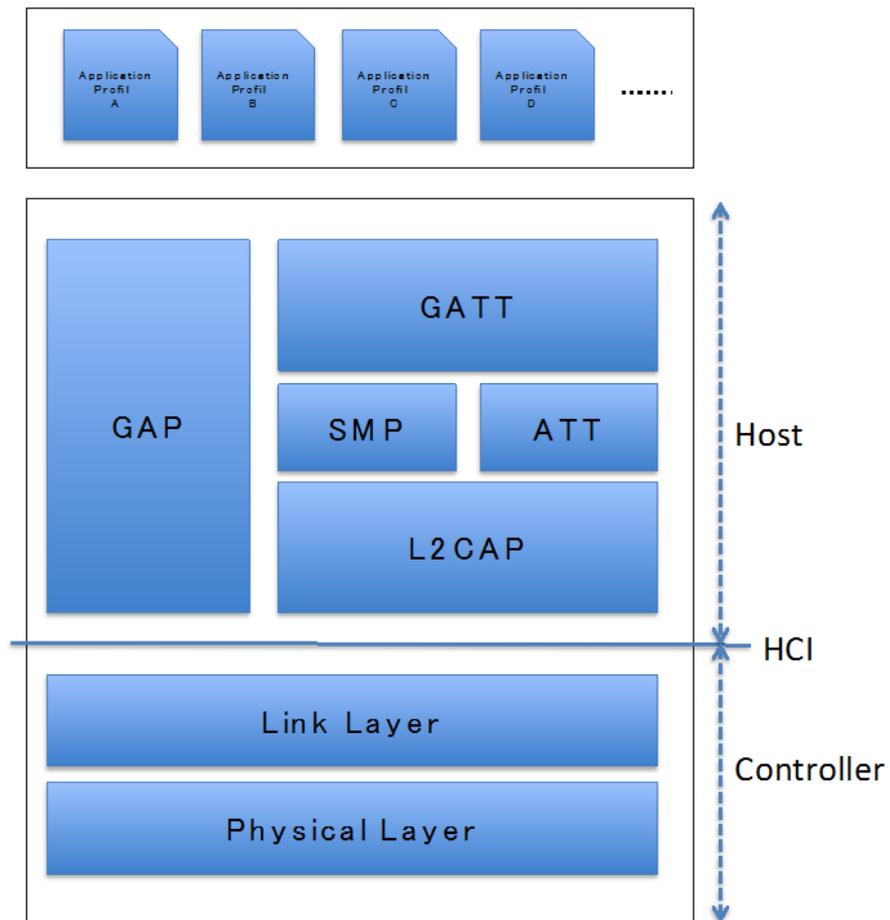


図 1. Bluetooth Low Energy のアーキテクチャ

- コントローラ

コントローラは物理層と MAC（データリンク）層を担当する。物理層ではデータ送信レート 1Mbps の GFSK 周波数変調方式が実装されている。チャンネル数は 2MHz 幅で 40 チャンネル、うち 3 チャンネルがアドバタイズメントチャンネルで、残り 37 チャンネルがデータチャンネルである。MAC 層において、BLE では時刻同期の制約のために CCA（Clear Channel Assessment）などのキャリアセンスを用いていない。CCA などのキャリアセンスは通信する前にチャンネルの使用状況をスキャンし、その状況に依存して、送信を遅延する。BLE ではチャンネルホッピングのための時刻同期が必要であるため、キャリアセンスによるチャンネル状況に基づく電波の衝突回避のための遅延操作は、時刻同期において不利な制御となる。従って、BLE ではキャリアセンスを用いない。しかし、キャリアセンスを用いない場合、電波の衝突が発生する可能性が高まる。そのため、BLE ではアドバタイズチャンネルを IEEE802.11 との電波干渉が最も少ない 2.4GHz の両端と

IEEE802.11 のチャンネル 1 と 6 の間に配置している。チャンネルホッピングはスレーブノードにおけるアドバタイジングインターバル、スレーブ・レイテンシー、およびマスタノードのコネクションインターバルにより制御が可能である。アドバタイジングインターバルはスレーブノードにおけるアドバタイズメントパケットの送信周期である。コネクションインターバルはマスタノードがスレーブノードとの接続確立後のデータ交換周期であり、スレーブ・レイテンシーはスレーブノードがマスタノードからのデータ交換周期を無視して意図的にデータ送信周期を延長するパラメータである。これらパラメータはホストから設定可能であり、アプリケーションのニーズに応じて省電力を可能としている。また、チャンネルホッピングにおける利用チャンネルリストは電波干渉の高いチャンネルを排除する適応型チャンネルホッピングとなっている。

- ホスト

ホストは次の階層から構成される。

L2CAP(Logical Link Control and Adaptation Protocol)

データ分割・再構成、着信確認・再送などの無線通信の論理リンクの管理プロトコルである。

ATT (Attribute Protocol)

アトリビュート(Attribute)とは、アプリケーションのサーバとクライアント間のサービスを構造化する定義であり、ハンドル、タイプ、値から構成される。ATT はアプリケーションのサーバとクライアント間でアトリビュートを送受信するためのプロトコルである。

SMP (Security Manager Protocol)

認証・暗号化などの関するセキュリティ管理プロトコルである。

GATT (Generic Attribute Profile)

アトリビュートを利用するためのアプリケーションインターフェイスである。アプリケーションはこのインターフェイスを用いて開発する。GATT の下位層として SMP, ATT が機能し、さらに SMP, ATT の下位層として L2CAP が機能する。

GAP (Generic Access Profile)

ネットワークの接続状態を管理するインターフェイスである。GATT と同様にアプリケーションにネットワークを管理するプログラムインターフェイスを提供する。GAP の下位層は HCI インターフェイスを介してコントローラが担当する。

- HCI インターフェイス

HCI インターフェイスは、ホストからコントローラの動作を制御するコマンド、コントローラからホストへコントローラの状態を通知するイベント、ホストとコントローラ間での双方向のデータ交換するデータから構成され、次の3つのインターフェイスをサポートする。

UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)

RS232, RS485 のシリアルインターフェイスを用いる方式である。シリアル通信の設定は、データビット8ビット、パリティビットなし、ストップビット1ビット、CTS/RTS によるフロー制御、送信速度は実装依存となっている。UART は省電力効果が高い。

USB (Universal Serial Bus)

PC の周辺機器に用いられているインターフェイスである。ホスト部が PC, タブレット PC である場合に多く用いられるインターフェイスである。

SDIO (Secure Digital Input/Output)

SanDisk などで持ちられている小型メモリーカードのインターフェイスである。

- プロファイル

BLE のアプリケーション層の規格である。プロファイルは標準プロファイルとユーザ独自のプロファイルに分けられる。標準プロファイルに準拠することにより、多様なアプリケーションとの相互接続性が保証される。

Bluetooth 5.0 においては、データレートは従来の2倍の2Mbps、送信距離は従来の4倍までサポートされる。また、メッシュネットワークがサポートされる。データレートは2Mbps まで拡張されているが、2Mbps とした場合、送信距離は、従来の1/2に短くなり、通信距離を4倍とした場合、データレートは従来の1/4の250Kbps となる。すなわち、データレートを上げる場合は送信距離を犠牲にする必要があり、通信距離を伸ばすためにはデータレートを犠牲にする必要がある。メッシュネットワークにおけるデータ転送は、アドバタイジングチャンネルを用いたフラッティングベースのデータ転送方式であり、転送効率が低いと考えられる。メッシュネットワークを大規模化するには、転送効率を高める制御方式は必須であるとされる。

(2) IEEE802.15.4 (ZigBee, SUN)

IEEE802.15 ワーキンググループは、クラシック Bluetooth を無線センサネットワークに適用するには省電力が不十分であることから標準化活動が開始され、その

中で最も有用な規格が IEEE802.15.4 である。IEEE802.15.4 は低通信速度、低消費電力、低コストの3つの特徴を有する。IEEE802.15.4 は物理層と MAC 層の2つの規格から構成される。さらに、工場など利用を想定した MAC 層の規格として IEEE802.15.4e、920MHz の周波数を利用とする物理層の規格として IEEE802.15.4g がある。IEEE802.15.4 の上位層規格としては、ZigBee、SUN などの独自仕様、インターネットとの接続を前提とする 6LowPAN があげられる。

IEEE802.15.4 物理層は、868MHz、915MHz、2.4GHz の周波数帯を用いるが、日本で利用可能な周波数帯は 2.4GHz のみである。IEEE802.15.4 2.4GHz 帯のチャンネルは 2MHz 幅で 16 チャンネルとなる。変調方式は O-QPSK を採用し、データ送信レートは 250Kbps である。拡散方式として、直接拡散 (DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum) を用いて、電波干渉への耐性を高めている。

IEEE802.15.4 MAC 層は、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を採用している。CSMA/CA は、通信を開始する前にチャンネルの使用状況を、キャリア (搬送波) をセンシングすることにより確認し、ランダムな時間を待機後に送信を開始する。このランダムな待機時間により複数のノード間での送信データの衝突を回避する。しかし、隠れ端末問題やノード数の増加により送信データの衝突を回避できない場合が発生する。この問題を解決するため、IEEE802.15.4 MAC 層では、スーパー・フレームを採用している。スーパー・フレームは、仮想的な送信時間の割り当てである。スーパー・フレームは、競合アクセス期間 (CAP : Contention Access Period) と無競争アクセス期間 (CFP : Contention Free Period) から構成される。CAP においては、CSMA/CA によりノード間で競合しつつ、CAP のタイム・スロットを共有利用する。そのため、遅延時間や衝突が発生する期間である。一方、CFP は 期間スロットを GTS (Guaranteed Time Slot) と呼ばれる保証タイム・スロットを予めノードに割り当てることにより、遅延時間の保証と衝突の回避を実現する。スーパー・フレームは 16 個のタイム・スロットに分割され、最初のタイム・スロットはビーコン用に用いられる。残り 15 個のタイム・スロットは、CAP と CFP にそれぞれ割り当てられる。配置は最初に CAP その後 CFP である。CFP はオプションであり、最大で 7 タイム・スロットである。スーパー・フレームを用いるためには、ネットワーク上のノード間での同期が必要となる。この同期を取るためにビーコンが用いられている。IEEE802.15.4 MAC 層では、コーディネータまたはルータがビーコンをスーパー・フレームの最初のタイム・スロットを用いて周囲へブロードキャストする。これを受信したノードとでスーパー・フレームの同期が取られることになる。IEEE802.15.4 では、最短のタイム・スロットは 60 シンボルであり、2.4GHz

帯においてはシンボルレートが 62.5K シンボル/秒となることから、タイム・スロットは 960 マイクロ秒となる。従って、16 スロットから構成される基本スーパー・フレームの期間は 15.36 ミリ秒となる。IEEE802.15.4 MAC 層では、この基本スーパー・フレーム期間を基準にスーパー・フレーム・オーダー (SO : Super frame Order) により「基本スーパー・フレーム期間 $\times 2^{SO}$ ($0 \leq SO \leq 14$)」としてスーパー・フレーム期間を規定する。さらに、ビーコンの送信周期として、基本スーパー・フレーム期間を基準にビーコン・オーダー (BO : Beacon Order) により「基本スーパー・フレーム期間 $\times 2^{BO}$ ($0 \leq BO \leq 14$)」とする。BO > SO においてはビーコン周期にスーパー・フレーム期間が内包される。従って、BO により指定されたビーコン周期において、SO で指定されたスーパー・フレームの期間がノードのアクティブな期間であり、残りのビーコン周期の期間においては、ノードはスリープ状態へ遷移して省電力を図ることが可能である。

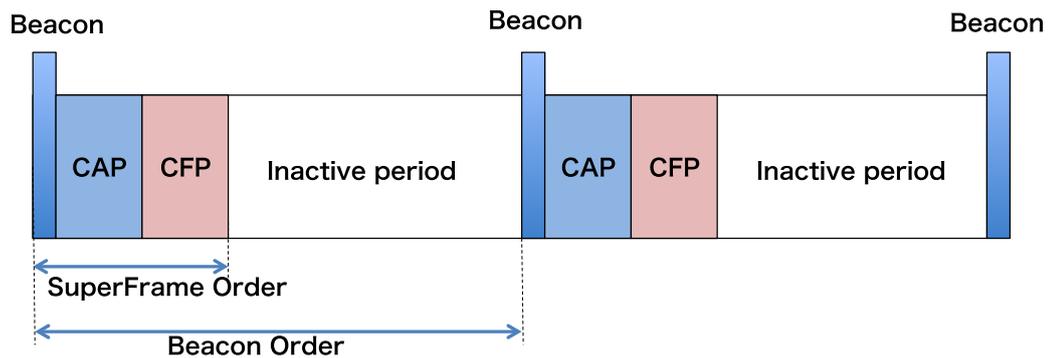


図 2. IEEE802.15.4 スーパー・フレームとビーコン

IEEE802.15.4 MAC 層のデータ送信手順はビーコンモードとノンビーコンモードに分けられる。ビーコンモードはスター型トポロジで利用可能である。子ノードから親ノードへのデータ通信手順はプッシュ型通信となる。すなわち、親ノードからのビーコンを受信後、スーパー・フレームの同期を確立し、GTS スロットが割り当てられている場合は CFP で、割り当てられていない場合は CAP でデータを親ノードへ送信する。CAP は CSMA/CA を行い、タイム・スロットに同期して送信を行う。親ノードから子ノードへのデータ通信はプル型通信となる。親ノードからのビーコン受信によりスーパー・フレームの同期を確立し、ビーコンに親ノードから自身への送信データがあることを示している場合は、親ノードへデータ送信要求を送り、親ノードはその要求の ACK を返し、その後にデータを子ノードへ送信する。ノンビーコンモードでは、すべてのノードは常にアクティブ状態であり、常時データ通信が行え

る。従って、スーパーフレームの同期は不要であるため、ビーコン送信は行わない。すなわち、ノンビーコンモードの送信手順はビーコンモードのノード間のビーコン送信とその応答を省略した手順となる。

IEEE802.15.4g は 920MHz 帯（サブ GHz 周波数帯）の周波数帯を利用する物理層の規格である。2.4GHz 周波数帯は多様な無線デバイスが共存しているため、電波干渉が非常に高い。これを回避するために、アンライセンスバンドとして 920MHz 周波数帯を整備して設定した。920MHz 帯は 2.4GHz 帯より帯域が狭いが、通信距離が大きく伸びる。そのため、2.4GHz と比較すると通信において競合するノード数が増加することになる。さらに、通信帯域が狭く通信速度が低いためデータ送信時におけるチャンネル占有時間が増加する。以上のことから、920MHz 帯では送信時間 (Duty Cycle) に制約を設定している。具体的には、20 ミリ W 送信電力型・920.6～923.4MHz では、キャリアセンス時間 5 ミリ秒以上、連続送信時間 4 秒以内、休止時間 50 ミリ秒以上、20 ミリ W 送信電力型・922.4～928.0MHz では、キャリアセンス時間 128 マイクロ秒以上、連続送信時間 1 チャンネル使用 400 ミリ秒以下、2 チャンネル使用 200 ミリ秒以下、3 チャンネル使用 100 ミリ秒以下、休止時間 2 ミリ秒以上、1 ミリ W 送信電力型・916.0～916.8MHz・922.4～928.0MHz では、キャリアセンスなし、連続送信時間 100 ミリ秒以内、休止時間 100 ミリ秒以上、1 ミリ W 送信電力型・928.1～929.65MHz では、キャリアセンスなし、連続送信時間 50 ミリ秒以内、休止時間 50 ミリ秒以上、となっている。920MHz 帯は極めて少量データを 1 日に数回、遠隔へデータ通信することを想定した規格となっている。また、各ノードにおいて、Duty Cycle 以外の期間はスループ状態へ遷移して省電力を図ることを可能としている。

IEEE802.15.4e は、IEEE802.15.4 MAC 層は工場用無線センサネットワークとしては機能が不足しているため、2012 年に工場用無線センサネットワークの MAC 層の規格として IEEE802.15.4e をリリースした。IEEE802.15.4e は次の 3 つのタイプの異なる MAC 層を規格している。

- TSCH チャンネルホッピング型ネットワーク

米国ダストネットワーク社は、無線センサネットワーク用の TDMA 技術を開発し、WirelessHART (IEC6251) と ISA100 として採用された。本方式は、ダストネットワーク社の TDMA 技術に TSCH (Time Slot Channel Hopping) を加えた方式である。TCSH アクセス方式は、通信チャンネルを一定時間 (タイム・スロット) に分割して、アクセス権を制御する。すなわち、データ通信において送信ノードと受信ノードを同じタイム・スロットに割り当てることにより、データ通信

における干渉を排除できる。また、タイム・スロットに基づく時刻同期が取られるため、送信タイミングおよび受信タイミングがスケジュールされて既知となるため、送受信以外の期間をスループ状態へ遷移して省電力化が図れる。

TSCH アクセス方式は、BLE のチャンネルホッピングと同様に、電波干渉が高いチャンネルはホッピングチャンネルリストから排除される。

TSCH ネットワークはメッシュネットワークを想定する。メッシュネットワークの構成は IEEE802.15.4e の規格外であるが、WirelessHART や ISA100 では規定されている。TSCH ネットワークの構成やルーティングは、ネットワークのコーディネータが集中制御で決定する。コーディネータの強化ビーコンに基づき、すべてのノードは自身の隣接関係などの情報をコーディネータへ転送する。コーディネータはすべてのノードからの情報を用いて、すべてのノードの TSCH に関するスケジュールを算出してノードへ通知する。以降、この TSCH アクセススケジュールに従いデータ通信を実施する。

- 低遅延決定性ネットワーク (LLDN)

LLDN (Low Latency Deterministic Network) は低遅延を目標とするネットワークである。トポロジはスター型である。LLDN ネットワークはビーコン型ネットワークであり、ビーコンとスーパー・フレームとを用いた同期通信によりネットワークを構成する。LLDN のスーパー・フレームの形式は IEEE802.15.4 のスーパー・フレームの形式とは異なるが、最初のスロットがビーコンであり、これによりスーパー・フレームの同期が取られる点は同じである。スーパー・フレームはビーコンスロットの後に上り方向管理スロット、下り用管理スロットがあり、続いて事前に決められた上り用データスロット、双方向データタイムスロットにより構成される。上り方向管理スロットはビーコン受信によりスーパー・フレームの同期が取れたノードが「発見」の状態となり、ネットワークに参加するためにコーディネータへネットワーク参加への要求を送信するために用いられ、下り方向管理スロットはコーディネータからノードへネットワーク参加要求の応答を返すために用いられる。この応答を受けたノードは「発見」状態から「設定」状態へ以降し、次の下り方向管理スロットに含まれる設定情報により、利用すべきデータスロットを設定し「オンライン」状態へ移行する。以降、データスロットを用いてはコーディネータとデータ通信を行う。

- DSME スーパーフレームネットワーク

DSME (Deterministic Synchronous Multichannel Extension) は、IEEE802.15.4 のビーコンモードによる通信を改善した方式である。メッシュ型トポロジを想

定し、複数のコーディネータが共存できるようにビーコンの送信タイミングをアービトレーションする。電波干渉を緩和するためにチャンネルホッピングを取り入れ、さらに最大 CFP スロット数を増やした。スーパー・フレームは IEEE802.15.4 と同様に、16 個のタイム・スロットに分割され、最初のスロットはビーコン用、8 スロットの CAP、7 スロットの CFP からなる。さらに、マルチスーパー・フレームを導入し、複数の連続したスーパー・フレームを構成する。マルチスーパー・フレームの期間は「基本タイム・スロット期間 $\times 2^{M0}$ ($0 \leq M0 \leq 14$)」として設定される。すなわち、 $B0 \geq M0 \geq S0$ となる。2 目以降のスーパー・フレームのビーコンスロットは隣接のコーディネータからのビーコン受信に利用する。CAP は 1 チャンネルに限定されるが、CFP はチャンネルホッピングにより複数チャンネルを用いて、電波干渉を抑制するとともに通信容量の拡大を図っている。

(3) LPWA

LPWA (Low Power Wide Area) は、低消費電力広域無線通信であり、IoT アプリケーションによる利用を想定する。特徴として低消費電力、広域のデータ通信、インターネット接続があげられる。LPWA には、920MHz 帯のアンライセンスバンドを利用周波数帯として用いる LoRaWAN, SIGFOX と LTE のライセンスバンドを利用する Cat M1 (eMTC), NB-IoT がある。

SIGFOX は、SigFox 社が提供する IoT 通信インフラ (基地局) と SIGFOX デバイスから構成されるネットワークである。SIGFOX の特徴は、少量データ (データサイズ 12 バイト) の低速通信 (100bps)、上り単方向通信、長距離通信 (屋外で 10Km, 屋内で 3Km)、低消費電力 (数回送信/日で数年の電池寿命)、インターネット接続である。SIGFOX の物理層は、アンライセンスバンドである 920MHz 帯のサブ GHz 帯を利用する。変調方式は実装が容易な DBPSK (Differential BPSK) を採用している。データ送信レートは 100bps であるが、サブ GHz 帯を使用するため、IEEE802.15.4g と同様に、20 ミリ W 送信電力型・920.6~923.4MHz における国内規制 ARIB STD-T108 「キャリアセンス時間 5 ミリ秒以上、連続送信時間 4 秒以内、休止時間 50 ミリ秒以上」の制限がある。欧州の ETSI 規制では Duty Cycle が 1 時間単位で 1% 以下という送信時間総和の制限があるため、1 時間で最大送信データ量 450 バイト (3600bits) と極めて少量となる。最大送信電力は、上記の国内規制に従い、20 ミリ W である。チャンネル数は 200KHz を 100Hz 幅に分割することで、数百本設定し、多数の SIGFOX デバイスの収容を図っている。SIGFOX の MAC 層は、アンライセンスバンドのサブ GHz 帯の電波干渉を回避するためチャンネルホッピングを

用いている。チャンネルホッピングでは、送信側と受信側で時刻同期が必要となるが、時刻同期の制御は省電力に不利に働く。従って、省電力を必要とする SIGFOX デバイス（送信側）は、任意のタイミングでチャンネルを切り替えてデータを送信し、これを基地局側（受信側）で任意のチャンネルのデータを受信できるよう動作し、時刻同期を行わずに、チャンネルホッピングを実現している。上り方向のアクセス制御も ALOHA 方式で非常に単純であり、SIGFOX デバイス（送信側）の負荷は非常に低い。SIGFOX は、上記の国内規制に加えて、契約内容により最大送信回数（上り送信回数最大 140 回から最小 2 回まで）を設定している。SIGFOX のネットワークは多数の SIGFOX デバイスと基地局による Multipoint-to-Point のスター型トポロジである。SIGFOX デバイスは複数の基地局と通信が可能であり、この場合、基地局はデータの重複受信することによりデータの信頼性を高めている。

LoRaWAN は、Semtech 社が主導する LoRa アライアンスによる広域ネットワーク WAN の規格である。LoRa は、Semtech 社が開発した低消費電力・長距離通信用の無線技術である（LoRa: Long Range）。LoRaWAN は、SIGFOX と異なり、ユーザが自営 LoRaWAN 基地局を用いて LoRaWAN ネットワークを構築することが可能である。

LoRaWAN は IoT 通信を目的として、長距離通信（屋外 10Km, 屋内 3km）、適応データレート（近距離では高いデータレート、遠距離では低いデータレート）、低消費電力、インターネット接続、双方向通信などが特徴である。LoRaWAN システムは、LoRaWAN デバイス、基地局、インターネットへの接続するネットワークサーバから構成される。LoRaWAN の物理層は、アンライセンスバンドのサブ GHz 帯を利用周波数として用いる。チャンネルの帯域幅は 125KHz であり、IEEE802.15.4g、SIGFOX と同様に、サブ GHz 帯を利用することから、20 ミリ W 送信電力型・920.6~923.4MHz における国内規制 ARIB STD-T108「キャリアセンス時間 5 ミリ秒以上、連続送信時間 4 秒以内、休止時間 50 ミリ秒以上」の制限がある。最大送信電力は国内規制により 20 ミリ W である。変調方式は、上り・下り方向とも LoRa 変調と FSK の 2 種類の変調方式をサポートする。LoRa 変調方式は、Semtech 社が開発した変調方式で PSK に似た変調方式であるが、拡散指数により多値化を変更できる。LoRaWAN の MAC 層は、チャンネルホッピング、デバイスクラス、アクセス制御、受信確認と再送、適応データレートなどがサポートされている。チャンネルホッピングは、サブ GHz 帯の利用を想定して、電波干渉の回避を図る。チャンネルホッピングは送信側と受信側で利用チャンネルを切り替えて電波干渉を避けて通信する。そのためには、時刻同期が必要であるが、時刻同期は送信側と受信側が送受信のタイミングを合わせることから、送受信以外の時間においてスリープ状態へ移行し省電力化が図れるが、時刻同

期の制御のために電力を消費する側面もある。LoRaWAN では、SIGFOX と同様に、省電力を必要とする LoRaWAN デバイスは任意のタイミングでランダムに送信チャンネルを切り替え、基地局がすべてのチャンネルからデータを受信することにより、時刻同期の制御を排除する。LoRaWAN は、3 つのデバイスクラスを設けている。クラス A は任意のタイミングデータ送信ができ、受信は送信直後のみ可能で、受信が完了後即時にスリープ状態となる省電力デバイス、クラス B はクラス A の機能に加え、任意のタイミング受信モードになり、基地局からのビーコンが受信できるデバイスであり、クラス A のデバイスより消費電力が高くなる。クラス C は、常時受信可能なデバイスで消費電力は非常に高い。LoRaWAN のアクセス制御は ALOHA 方式に CCA (Clear Channel Assessment) を加えた方式を用いている。このアクセス制御では LoRaWAN デバイスが、データ送信の前に CCA (チャンネルのキャリアセンス) を行い、チャンネルの空きを確認して送信を行う。その後受信モードに切り替えて基地局からの応答を受信する。LoRaWAN は基地局から受信確認に関して、データのタイプが「重要」とする場合に基地局からの受信確認が下り方向の専用チャンネルにより送られる。デバイス側で受信確認の受信に失敗した場合 (一定時間内に受信なし)、チャンネルを切り替えて再送をする。受信確認が不要なデータは再送を行われない。適応データレート ADR (Adaptive Data Rate) は、デバイスと基地局間での電波状況に応じて、データレートを変更する。基地局はデバイスからのデータ受信時に RSSI を計測し、これに基づき DR0~DR7 (LoRa 変調の拡散指数、おとび FSK) のデータレートから最適なレートを決定し、デバイスへ通知する。

Cat M1 (Category M1) と NB-IoT (Narrow Band-Internet of Things) は、携帯電話の国際標準化団体 3GPP が LTE 技術をベースに開発した低消費電力・広域通信の規格である。Cat M1 と NB-IoT は、SIGFOX や LoRaWAN と異なり、LTE で用いているライセンスバンドの周波数帯を利用する。Cat M1 と NB-IoT の特徴は、LTE 規格との互換性、広域サービス (LTE 基地局が使える)、低消費電力である。LTE は MIMO と OFDM により高速で広域な無線通信を実現している。Cat M1 と NB-IoT は、LTE 技術の OFDM をサポートしている。Cat M1 は、Cat5~1 の LTE 技術の 1 つであり、MIMO を排除した低速の携帯電話用の規格であった。これをさらに IoT デバイス向けに軽量化した Cat M1 リリース 13 が、上り方向・下り方向 1Mbps のデータレートとする「eMTC」として発表された。一方、NB-IoT は 3G (第 3 世代) 携帯電話の無線通信技術である GSM 技術を進化させた方式で、上り方向 250Kbps または 20Kbps、下り方向 250Kbps のデータレートとなる。Cat M1/eMTC は LTE との完全な互換性があるが、NB-IoT は一部の互換性のみとなる。Cat M1 と NB-IoT のシステム構成は LTE

と同様に、端末である UE (User Equipment) と基地局である eNB (evolved Node B) または BSS (Base Station System) から構成される。Cat M1 と NB-IoT の送信電力は、いずれも 200 ミリ W (従来の LTE) と 100 ミリ W の 2 つのクラスがサポートされている。SIGFOX や LoRaWAN と比較すると高い値となっている。変調方式は、Cat M1 は QPSK と 16QAM, NB-IoT は BPSK と QPSK をサポートしている。Cat M1 は多値化が高い変調方式により NB-IoT より高い送信レートとなる。Cat M1 と NB-IoT は、いずれも SC-OFDM (Single Carrier OFDM) をサポートし、マルチパスフェージングの耐性と送信データ量の増大を図っている。一方、LTE では全 2 重通信と MIMO がサポートされているが、Cat M1 と NB-IoT においては、半 2 重通信であり、SISO (単一アンテナ) となる。Cat M1 のチャンネル帯域幅は 1.4MHz, サブキャリア帯域幅は LTE と同様に 15KHz, サブキャリア数 72, リソースブロック数 6 である。Cat M1 では、LTE と同じチャンネルを共有する (インバンド) ため、IoT デバイスのトラフィックが LTE の本来のデータ転送に影響を与える可能性がある。NB-IoT のチャンネル帯域幅は 200KHz, サブキャリア帯域幅は 15KHz に加えて 3.75KHz, 帯域幅 15KHz 場合サブキャリア数は 12, 3.75KHz の場合は 48, リソースブロック数は 1 である。NB-IoT はチャンネルを LTE と共有する (インバンド) こともできるが、帯域が狭いので、LTE のガードバンドを利用することができ、LTE の本来のデータ転送に影響を与えないことも可能である。LTE の MAC 層では、時間とチャンネル (リソースブロック) を割り当ててスケジューリングすることによりアクセス制御を行う。Cat M1 と NB-IoT は、それぞれリソースブロック数が 6 と 1 であり、これを LTE のスケジューリングにおいて割り当てられる。Cat M1 と NB-IoT の省電力動作は、接続モード (Connected Mode), 待機モード (Idle Mode), PSM モード (Power Save Mode) の動作モードから構成される。接続モードは正常動作モードでデータの送受信ができる。待機モードは、受信のみが可能な状態で、基地局が端末を制御できる。PSM モードはディープスリープ状態となり送受信ができない状態である。ディープスリープ状態はほぼ電源が切られた状態であり、マイクロ A レベルの消費電力で維持できる。これら各モードを時間に基づき遷移させて省電力を図る。さらに、待機モードでの省電力を図るため、LTE の DRX (Discontinuous Reception) 機能を拡張した eDRX (extended Discontinuous Reception) 機能をサポートする。eDRX は、待機モードにおける基地局からの制御データ (ページング) の監視周期を 1.28 秒から、Cat M1 で最大 44 分、NB-IoT で最大 175 分に拡大した。

4.2. 無線デバイスの位置推定技術

IoT デバイスは無線デバイスを装備したデバイスであることを前提として、無線

を用いたデバイスの位置推定技術について説明する。無線デバイスの位置推定方式は、Range-based 方式と Range-free 方式に大別できる。

(1) Range-based 方式

Range-based 方式は、無線デバイス間の距離を測定することにより無線デバイスの位置を推定する方式である。無線デバイス間の距離を計測する方式は、ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival), RTOF (Round Trip of Flight) の3方式がある。

ToA:

ToA は2つの無線デバイス間において、電波が送信デバイスから受信デバイスまでに到着するのに要した時間から、距離を算出する方式である。デバイス間で厳密な時刻同期が必要である。代表的な応用システムとしてGPS(Global Positioning System)がある。

TDoA:

TDoA は、2つの無線デバイスにおいて、電波と音波など異なる速度で伝搬するメディアを用いて送信デバイスから受信デバイスまでに到着するのに要した時間の差から、距離を算出する方式である。デバイス間で同期時刻は不要であるが、伝搬速度の異なるメディアを2種類用意する必要がある。応用システム例としてはCricketがある。Cricketは電波と音波の2つの速度の異なる搬送波を用いて、無線デバイス間の距離を測定する。

RToF:

RToF は、2つの無線デバイスにおいて、送信デバイスと受信デバイス間で電波が往復するのに要した時間から、距離を算出する方式である。ToAにおける厳密な時刻同期は不要であり、またTDoAにおける速度の異なる2種類の搬送波も不要である。ただし、測距精度は受信デバイスにおける電波の折り返し遅延の見積りに強く依存する。システム例としては、Impulse UWB (Ultra Wide Band, IEEE802.15.4a)を用いた製品がある。

Range-base 方式は上記3方式のいずれかにより計測されたデバイス間距離を用いて、多くは3編測量から位置推定を行う。従って、位置が未知である無線デバイスの位置を推定するためには、位置が既知である無線デバイス(以降、定点デバイス)との距離を測定する必要があり、2次元座標では少なくとも3定点デバイスからの距離、3次元座標では少なくとも4定点デバイスからの距離が必要となる。屋内環境において、移動する無線デバイスの位置を推定するためには、3定点デバイスと無線通信可能であることが必須であるため、屋内環境において相当数の定

点デバイスの配置が必要となる。さらに、3方式の測距において、無線デバイス間の電波伝搬は見通し内を前提としているため、測距精度を維持するためには障害物による電波的な見通し外となる配置を排除することを考慮する必要がある。

Range-based方式は、一般的に、位置推定精度は高いが、無線デバイス側に無線による測距の追加機構が必要となるため、無線デバイスの価格は比較的に高くなり、また省電力においても不利となる。また、相当数の定点デバイスを無線において見通し内とするように配置／設置する必要があるため、測位設備の導入コストは高くなり、屋内環境のレイアウト変更に従い、定点デバイスの配置の見直しが必要となるため、測位設備の維持管理コストも高くなる。

(2) Range-free方式

Range-free方式は、無線デバイス間の距離の測定を不要とする無線デバイスの位置を推定する方式である。Range-free方式は無線デバイス間の距離の代わりに、無線デバイス間の接続関係やトポロジを用いる方式と無線の proximity や強度を用いる方式に分けられる。

接続関係やトポロジを用いる位置推定方式：

接続関係やトポロジを用いる位置推定方式は、無線メッシュネットワークを想定して、メッシュネットワークにおける無線デバイスの接続関係やトポロジを用いて位置を推定する。無線デバイス間の距離はユーグリッド距離を用いるのではなく、無線デバイス間のホップ数を相対的距離として用いる。システム例としては、DVHop, APIT があげられる。

DVHopは無線メッシュネットワークにおいて3定点デバイスを配置する。3定点デバイス間のホップ数と3定点デバイス間のユーグリッド距離から1ホップの平均ユーグリッド距離を算出する。この1ホップの平均ユーグリッド距離に基づき、位置が未知である無線デバイスと3定点デバイスとの各ホップ数から、無線デバイスと3定点デバイス間のユーグリッド距離を算出する。この算出距離および3定点デバイスの位置を入力として3辺測量から位置を推定する。DVHopはホップ数から求めた距離を用いるため、その距離の解像度が荒く、高い精度が得られない。また、その精度は電波伝搬におけるマルチパスフェージング（送信無線デバイスと受信無線デバイス間において直接波と間接波が重なり、電波強度が瞬時変動する現象）の影響を受けやすく、実用的な精度が得られない。

APITは、無線メッシュネットワークにおいて、多数の定点デバイスを配置し、これら定点デバイスにより構成される複数の三角形トポロジにおいて、位置が未知の無線デバイスが三角形トポロジの内部に含まれるかまたは外部にあるかによ

り所在位置の領域を絞り込んで、その位置を推定する。APIT は DVHop と比較すると、マルチパスメージングの影響を受けにくい。しかし、そのためには相当数の定点デバイスを配置する必要がある。

電波強度や Proximity を用いる位置推定方式：

電波強度や Proximity を用いる方式は、位置が未知の無線デバイスと複数の定点無線デバイスと電波カバレッジおよび電波強度から位置を推定する。無線メッシュネットワークの構成は想定せず、位置が未知な無線デバイスと定点デバイスとのスター型トポロジを用いる。ネットワーク構成はメッシュトポロジと比較すると、容易である。しかし、トポロジによる制約条件が少ないため、精度は接続関係やトポロジを用いる位置推定方式より低く、精度向上には接続関係やトポロジを用いる位置推定方式より多くの定点デバイスを必要とする。システム例として iBeacon, IMES などがあげられる。

Range-free 方式は無線デバイスに測距するための追加機構を必要としないため、無線デバイスを低価格化・小型化することが可能であり、また、省電力においても有利である。しかし、Range-based 方式と比較すると、その精度は著しく低くなる。精度を向上させるためには、定点デバイスを相当数必要とするため、測位設備のコストが非常に大きくなる。また、マルチパスフェージングの影響を受けやすく、高い位置推定精度は期待できない。

(3) その他の電波を用いた位置推定方式

その他の電波を用いた位置推定方式として AoA (Angle of Arrival) に基づく方式と電波によるフィンガープリンティング方式がある。AoA 基づく方式は位置が未知である無線デバイスが発する電波の到来方向を定点デバイスでスキャンして位置推定を行う。Bluetooth 5.0 においてオプション機能として標準化が進められている。電波の到来方向を検知するためには、アンテナアレイ技術が必須であり、これを装備する無線デバイスは価格が高くなる。また、電波伝搬では見通し内であることが必須であり、障害物の多い環境では精度が大きく劣化する。電波によるフィンガープリンティング方式は、事前に環境の電波強度マップを作成し、無線デバイスがスキャンした電波強度を作成マップとマッチングして、その位置を推定する。フィンガープリンティングは定点無線デバイスの数を抑制できるが、事前のマップ作成とその維持にコストがかかり、また精度もマップの精度に大きく依存する。

5. 省電力無線メッシュネットワークの適用可能性と課題

本章では、3章のIoT応用アプリケーションの適用シナリオにおけるニーズに基づき、省電力無線メッシュネットワークの適用可能性と課題を示す。3章に基づいた場合、IoT応用アプリケーションの要件は無線デバイスによるデータ転送と無線デバイスの位置推定にそれぞれ大別できる。従って、各シナリオにおけるニーズをデータ転送と位置推定に分けて議論をすすめる。

5.1. データ転送に関する要件と課題

(1) 想定適用シナリオ1「屋内における人や物の位置の推定」

屋内における人や物の位置推定において必要となるデータは、無線デバイス間の隣接関係などのトポロジ情報、または隣接デバイスとの距離を示す情報と想定される。従って、データ量としては大きくないと想定される。一方で、ニーズに示されているように、無線デバイスの位置更新は分単位である。さらに、省電力、小型であることが求められている。

このようなニーズにおいて、LPWAのLoRaWANをデータ転送方式の適用候補として考える。具体的にはLoRa SF7（送信レート5.47Kbps、5ミリ秒のキャリアセンス、送信後の休止時間50ミリ秒）を用いて500バイトのデータ送信を行うことを想定する。この場合、1つの無線デバイスの送信時間は、おおよそ731ミリ秒であり、5ミリ秒のキャリアセンス時間、送信後の休止時間50ミリ秒を加えて、500バイトを786ミリ秒でデータ送信が可能である。一方、LoRaWANの基地局を屋内に設置した場合、基地局のカバレッジは3kmと言われている。3km範囲のカバレッジを想定した場合、カバレッジ内に収容されるLoRaWAN無線デバイスは相当数になることが予想される。すなわち、相当数のLoRaWAN無線デバイスで上記のLoRa SF7のリソースを共有することを考えると、1つのLoRa無線デバイスが500バイトを送信するために無線チャンネルを占有する時間は、キャリアセンス時間5ミリ秒、データ送信時間731ミリ秒、送信後の休止時間50ミリ秒の合計時間であり、おおよそ800ミリ秒である。位置更新周期は分単位であるので、1つの無線デバイスが500バイト/分で送信できることが条件となる。500バイト/分で無線デバイス数は、LoRaWAN SF7では、60秒/800ミリ秒=最大で75デバイスである。想定する屋内空間をオフィスと考えた場合、日本の一人当たりのオフィス面積は平均13~14平方メートル（廊下、会議室、ロッカー、キャビネットなどの空間も含む）と言われていることから、LoRaWANで500バイト/分でデータ送信可能な無線デバイスを収容できるオフィス面積は概ね最大で1000平方メートル程度となる。この面積は1フロアのオフィス面積として小さめであり、複数フローでは収容が困難となる。

同じ LPWA である SIGFOX は、LoRaWAN と比較して送信時間制限が厳しいため、LoRaWAN 以上に通信容量の制限から適用は困難である。また、eMTC、NB-IoT のデータレートは、それぞれ 1Mbps、250Kbps であるが、通信カバレッジが数 Km となるため、やはり、LoRaWAN と同様に適用は困難である。

次に BLE をデータ転送の候補として考える。BLE はデータレート 1Mbps、実効送信速度 270Kbps である。従って、500 バイトを送信するのに要する時間は 1.5 ミリ秒であり、分単位の位置更新周期のデータ転送には十分な容量がある。しかし、BLE の送信カバレッジは 10~20m 程度であるため、基地局相当するゲートウェイデバイスを相当数の配置が必要となる。一方、Bluetooth 5.0 においては、メッシュネットワークはサポートされる。このメッシュネットワーク構成により、ゲートウェイデバイスを大幅に削減可能であり、500 バイト/分程度のデータ転送であれば、マルチホップ通信においても十分実現は可能である。しかし、マルチホップ通信は無線デバイスにおいて送信回数の増加となり、また、想定する無線デバイスは移動することから、データ通信のマルチホップ経路の更新制御が必要となる。これらの制御は省電力において不利になるため、省電力とするマルチホップ通信とそのルーティングが課題となる。

最後に、IEEE802.15.4 をデータ転送として考える。2.4GHz における IEEE802.15.4 のデータレートは 250Kbps であり、通信カバレッジは 30m 程度である。BLE と比較するとデータレートで 1/4、送信カバレッジ 2 倍である。BLE と同様に広域をカバーするにはマルチホップ通信によるデータ転送が必要である。しかし、カバレッジが 2 倍になるため収容デバイス数は 4 倍、一方で、データレートは 1/4 であるため、BLE と比較して 16 倍の遅延時間が発生すると予想される。マルチホップ経路のホップ数はカバレッジが 2 倍であるので半分程度になるが、遅延が 16 倍であるため、結果として 8 倍の遅延が予想される。この点において BLE が有利と考える。920MHz の IEEE802.15.4g は、最大データレート 400Kbps、通信カバレッジが数 Km である。SIGFOX や LoRaWAN と同様にアンライセンズバンドを使用するため、送信時間総和の制限 1% Duty または 10% Duty がある。従って、IEEE802.15.4g は LPWA と同様の問題により適用困難である。

(2) 想定適用シナリオ 2 「太陽光発電モジュール管理」

本シナリオにおいて、データの発生頻度は高くなく、データ量も多くない。従って、LPWA の適用が十分に考えられる。現状において、LTE を利用している点を考慮すると、NB-IoT の適用が妥当と考えられる。NB-IoT を適用する点で考慮すべき点は通信の遅延が許容範囲であるかの点になる。一方で、太陽光発電のための電源ケ

ケーブルはすでに敷設されている。すなわち、電源ネットワークが構成されていることであるので、無線通信を用いなくとも、PLC(Power Line Communication)によりデータ転送が可能と考える。

(3) 想定適用シナリオ3「屋外、外構などの照明システムの遠隔操作」

「太陽光発電モジュール管理」と同様に、データの発生頻度は高くなく、データ量も多くない。従って、データ転送としてはLPWAが適用可能と考えられる。一方で、対象が照明システムであるため、電源ケーブルが敷設されていることができるため、PLCを用いことも可能と考える。

(4) 想定適用シナリオ4「空間のアドホック・テンポラリなセンシング」

本適用シナリオはデータ量が少量であり、実時間性の必要性は低い。ただし、省電力は必要である。従って、データ転送としては、LPWAまたはIEEE802.15.4e/gの適用が適当と考えられる。

(5) 想定適用シナリオ5「公共インフラの維持管理」

本適用シナリオでは、データ量は少量、データ転送頻度は少なく、省電力が必要とされている。これも、LPWAまたはIEEE802.15.4e/gの適用が妥当と考える。トンネルなどの外部からの電波が届きにくい環境においては、LPWAのSIGFOX, Cat1 M1, MB-IoTは適用困難と考えられるので、維持管理現場にて自営ネットワークが構築できるLoRaWANやIEEE802.15.4e/gが適当と考えられる。

本適用シナリオにおいて常時計測の必要性がない場合、数ヶ月や数年の周期による断続的な計測の場合、恒常的なセンサーの配置は過剰である。従って、ロボットやドローンなどによる機動的なセンシングが求められるが、この場合のデータ転送ではデータ量は多くないがデータ転送頻度は高くなるため、LPWAでは容量が不足する。また、IEEE802.15.4e/gでは、移動への適用が困難である。従って、ロボットやドローンなどによる機動的なセンシングとする場合は、想定適用シナリオ1と同様にBluetooth 5.0による無線メッシュネットワークによるデータ転送が必要と思われる。

(6) 想定適用シナリオ6「土木工事および建設現場での重機等による接触事故防止」

本適用シナリオにおいてデータ量は少量であるが、データの発生頻度は高く、実時間性と省電力が求められる。データの発生頻度が高く、実時間性が必要であるため、LPWAやIEEE802.15.4e/gの適用は困難である。従って、2.4GHz帯を用いるIEEE802.15.4またはBluetooth 5.0の適用が考えられる。実時間性を満たすには送信レートが高いBluetooth 5.0が有利と考える。しかし、いずれにおいても、低速ではあるが移動が頻繁に発生するため、メッシュネットワークのルーティングの

制御が頻繁に必要となり，実時間性と省電力を満せない可能性がある。

5.2. 無線デバイスの位置推定に関する要件と課題

(1) 想定適用シナリオ1「屋内における人や物の位置の推定」

本適用シナリオはオフィスなどを想定しており，要求精度は数メートルであることから，測位設備に十分なコストをかけることができる場合，iBeaconなどのBluetoothによる電波のproximityによる位置推定方式が適用可能である。測位設備の導入コストや維持コストを抑制することが求められる場合は，測位設備に依存しない自律的な測位技術が必要である。

(2) 想定適用シナリオ2「太陽光発電モジュール管理」

本適用シナリオではデバイスの位置情報は不要であり，要件に含まれない。

(3) 想定適用シナリオ3「屋外，外構などの照明システムの遠隔操作」

本適用シナリオではデバイスの位置情報は不要であり，要件に含まれない。

(4) 想定適用シナリオ4「空間のアドホック・テンポラリなセンシング」

データ転送用の無線としてLPWAの利用が想定されるが，LPWAであるLoRaWANはデバイスの位置推定をサポートしている。しかし，位置推定の精度は100メートルと非常に粗く，要件を持たさない。さらに，一時的な計測であるためデバイスの位置推定のための常設の測位設備は期待できない。以上のことから，Bluetoothや2.4GHz帯のIEEE802.15.4などの近距離無線を用いた無線デバイスの自律的位置推定方式が必要と考える。

(5) 想定適用シナリオ5「公共インフラの維持管理」

屋外でのデバイスの位置推定はGPSが適当と考える。準天頂衛星により高い精度が得られるようになり，要件を十分に満たすと考える。ただし，GPS衛星の電波が届かないトンネルなどでは，Bluetoothや2.4GHz帯のIEEE802.15.4などの近距離無線を用いた無線デバイスの自律的位置推定方式が必要と考える。

(6) 想定適用シナリオ6「土木工事および建設現場での重機等による接触事故防止」

本想定シナリオでは，屋内作業であることからGPSの適用は困難である。また，建設現場であることから，恒常的な測位設備を用意することは困難である。従って，Bluetoothや2.4GHz帯のIEEE802.15.4などの近距離無線を用いた無線デバイスの自律的位置推定方式が必要と考える。

6. 課題とまとめ

現在の多くの適用シナリオはIoTデバイスを用いた「見える化」のアプリケーションである。すなわち，データ量が少量で，データの発生頻度は低く，実時間性を必

要としない要件が大部分である。このような要件におけるデータ転送は LPWA の技術を用いるが適当と考える。しかし、今後の IoT デバイスを用いたアプリケーションは「制御」を目的とするケースが増えてくると想定される。さらに、「制御」において実時間性を必要とするシナリオが、例えば、想定適用シナリオ 6「土木工事および建設現場での重機等による接触事故防止」などのようなケースが増えてくると考えられる。実時間性を必要とするシナリオでは、LPWA は適用困難である。従って、2Mbps の送信レートをもち、メッシュネットワークによりカバレッジの拡大が可能な Bluetooth 5.0 の適用が考えられる。Bluetooth 5.0 のメッシュネットワークにおけるデータ転送は、アドバタイジング用の 3 チャンネルをチャンネルホッピングして利用することから、電波干渉に耐性を有するが、データの転送はフラットニングベースであるため、データ転送効率が低い。この点から、Bluetooth 5.0 メッシュネットワークにおいて、データ効率の高いデータ転送方式が必要である。データ効率を上げるために、複雑なルーティング制御を加えると、省電力において不利となる。また、デバイスの頻繁な移動が想定されるため、常に経路更新が必要となり、さらに省電力が困難となる。従って、省電力のためにルーティング制御を排除し、経路を構成せず、かつデータ転送の効率を上げる方式を検討する必要がある。すなわち、将来の IoT「制御」アプリケーションを想定した場合、省電力と低遅延を両立させるデータ転送方式が必須である。

位置推定方式は、想定適用シナリオ 6「土木工事および建設現場での重機等による接触事故防止」や屋内での移動センシングを想定した場合、測位設備に依存しない自律的測位方式が必須である。また、「制御」を想定した場合、実時間での位置推定が求められる。さらに、前述のデータ転送の無線通信メディアと位置推定で用いる無線通信メディアは、デバイスのコストおよび省電力の観点から、これら 2 つの無線メディアを共有することが必須と考えられる。従って、Bluetooth 5.0 を用いた無線メッシュネットワークのデータ転送ネットワークをベースとして、これらの BLE デバイスの位置をデバイス間の協調から位置推定を行う方式が必要と考える。

J K A平成29年度機械振興補助事業

「IoT 社会進展に向けた新たな省電力無線メッシュネットワーク
の適用可能性調査研究」研究委員会
(通称：J K A省電力無線メッシュネットワーク研究委員会)
報告書

平成30年3月

作 成 一般財団法人 ニューメディア開発協会

〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3番2号

リブラビル

TEL (03)6892-5030 FAX (03)6892-5029