

通信障害に強い無線通信ネットワークの製造現場適用化研究（第2報）

Research of wireless communication network tolerant to network disturbances for applying manufacturing site.

電子・機械技術部 電子・情報科 柿崎正貴 三瓶史花 鈴木健司 山田昌幸
南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 三浦勝吏

製造現場における LPWA 無線の通信特性を明らかにするため、通信特性評価と、実証実験へ向けた IoT システム構築を行った。Wi-Fi HaLow の電波伝搬特性を明らかにし、LPWA 無線通信における電波伝搬特性は、通信規格の違いによる影響が非常に小さいことが分かった。また、ハイテクプラザ施設内に Wi-SUN FAN ネットワークを構築し、受信信号強度 RSSI[dBm]やパケットエラーレート PER[%]を測定することで、実環境における電波伝搬やネットワーク経路最適化、及びネットワークトラフィック輻輳の影響を調査した。さらに、実証実験へ向けた加工機稼働監視システムの設計・構築を行った。

Key words: 無線通信、ネットワーク、LPWA、Wi-SUN FAN、Wi-Fi HaLow

1. 緒言

製造現場の情報ネットワークには、Wi-Fi（無線 LAN）や有線ケーブル（有線 LAN）が広く利用される。しかし、Wi-Fi は設置が容易で高速なデータ伝送が可能な反面、電波到達距離が短く、通信範囲が限定される点や、障害物による電波遮蔽や電磁ノイズによる干渉を受けて、通信が不安定になる点が課題である。一方、有線ケーブル敷設は通信安定性・信頼性が高いうえ、高速なデータ伝送が可能だが、配線の取り回しを考慮した工場内の機器配置変更や製造ラインの再編成が必要となる等、導入障壁が高いことが課題である。

そこで近年注目されているのが、長距離通信可能で電波遮蔽や干渉に強いとされる 920MHz 特定小電力無線（Low Power Wide Area, LPWA）である。LPWA の通信規格は多数存在し、通信距離や通信速度等の仕様がメーカーから提示されている。しかし、製造現場等の障害物や電磁ノイズの多い環境下における通信性能は提示されていない。

本研究では、LPWA 無線通信を製造現場へ適用するための指針を得るため、障害物のある環境等における電波到達性や通信の安定性・耐障害性を評価し、製造現場における LPWA 無線の通信特性を明らかにする。さらに、実証実験として、LPWA を用いた無線通信 IoT システムを構築、実際の製造現場へ導入することで、実現場におけるシステム安定性や耐障害性を評価する。

第1報¹⁾では、LPWA 通信規格「Wi-SUN FAN」について、障害物の無い環境における電波伝搬特性を評価し、電波伝搬の距離減衰特性を明らかにした。また、受信信号強度に対する通信特性を評価し、安定通信可能な受信信号強度とデータレートとの関係を明らかにした。

本報では新たに、LPWA 通信規格「Wi-Fi HaLow」について、障害物の無い環境における電波伝搬特性を評価し、Wi-SUN FAN と比較することで、通信規格の違いによる電波伝搬特性の変化を調査する。また、ハイテ

クプラザ実験棟内に Wi-SUN FAN 無線モジュールを複数設置し、電波伝搬特性及び通信信頼性を評価することで、実環境における通信特性を評価する。

さらに、実証実験へ向けて、Wi-SUN FAN 無線モジュールを搭載した実験用 IoT デバイスの設計開発、及び実証実験用 IoT システムの概念設計・構築について報告する。

2. LPWA 無線通信特性評価

2. 1. 障害物の無い環境における電波伝搬特性評価

2. 1. 1. 実験

Wi-Fi HaLow 無線モジュールとして、Newracom 社 NRC7292²⁾ を搭載した評価用ボード SX-NEWAH-EVK(JP)³⁾（サイレックス・テクノロジー(株)製）を使用した。表1に、SX-NEWAH-EVK(JP)の仕様を示す。

測定環境を図1に示す。測定条件は第1報と同様、障害物の無いアスファルトの路面に送信機と受信機を設置し、送信機からデータ送信した際の、受信機の受信信号強度（Received Signal Strength Indicator, RSSI[dBm]）を測定した。送受信アンテナ間の距離は、50[m]間隔で最大 400[m]まで、測定点の±10[cm]、±20[cm]の地点で同様の測定を行った。送受信アンテナの地面からの高さを同一にしたうえで、アンテナ高

表1 Wi-Fi HaLow 評価ボード SX-NEWAH-EVK(JP)の仕様

規格	IEEE 802.11ah
周波数	920 MHz 帯
変調方式	OFDM
帯域幅	1MHz, 2MHz, 4MHz
データレート	50 kbps ~ 15MHz
セキュリティ	WPA2-PSK, WPA3(SAE/OWE)
消費電流(VDD=3.3V)	98 mA (PEAK) [送信] 40 mA (PEAK) [受信]
HOSTインターフェース	SPI



図1 受信信号強度の測定環境

さ 6.0[m]と 1.8[m]の 2パターンで測定した。なお、受信信号強度 RSSI [dBm]は無線モジュールに接続した Raspberry Pi 4 Model B⁴⁾ から iw コマンドを使用して取得した。

2. 1. 2. 結果・考察

送受信アンテナ間の距離 d [m]に対する RSSI [dBm]を図2に示す。第1報より、大地や大気電波吸収等による電波伝搬損失を表す減衰係数を l_1, l_2 とした伝搬損失 L_e として、以下の式で近似する。ただし、 λ [m]は波長、 d [m]は送受信アンテナ間距離である。

$$L_e [\text{dBm}] = l_1 \cdot 20 \log(d) + l_2 \cdot 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) = \alpha \log(d) + \beta \quad (1)$$

図2の結果から最小二乗法近似により、それぞれのアンテナ高さにおける電波伝搬の距離減衰特性が得られる。

アンテナ高さ 6.0[m] :

$$L_e = -15.36 \log(d) - 26.17 \quad (2)$$

アンテナ高さ 1.8[m] :

$$L_e = -31.82 \log(d) + 3.65 \quad (3)$$

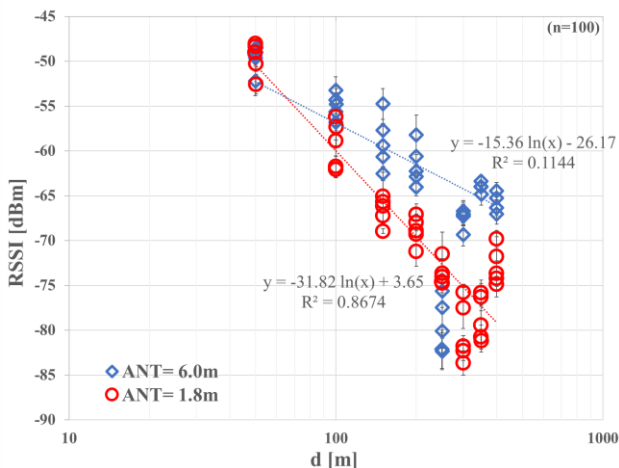


図2 障害物の無い環境における電波伝搬特性

さらに、第1報の結果から、Wi-SUN FANの電波伝搬の距離減衰特性は、アンテナ高さ 6.0[m]と 1.8[m]それぞれ以下の式で表される。

アンテナ高さ 6.0[m] :

$$L_e = -14.67 \log(d) - 38.49 \quad (4)$$

アンテナ高さ 1.8[m] :

$$L_e = -27.94 \log(d) - 13.76 \quad (5)$$

ここで、Wi-Fi HaLowとWi-SUN FANの電波伝搬特性について、アンテナ高さ 6.0[m]と 1.8[m]それぞれで比較した図を、図3と図4に示す。Wi-Fi HaLowとWi-SUN FANで式(1)の切片 β が異なるのは、無線モジュールのアンテナ特性や、回路構成の違いによるものと考えられる。一方、距離減衰率である式(1)の傾き α は、2つの規格で大きく異なることはなく、特にアンテナ

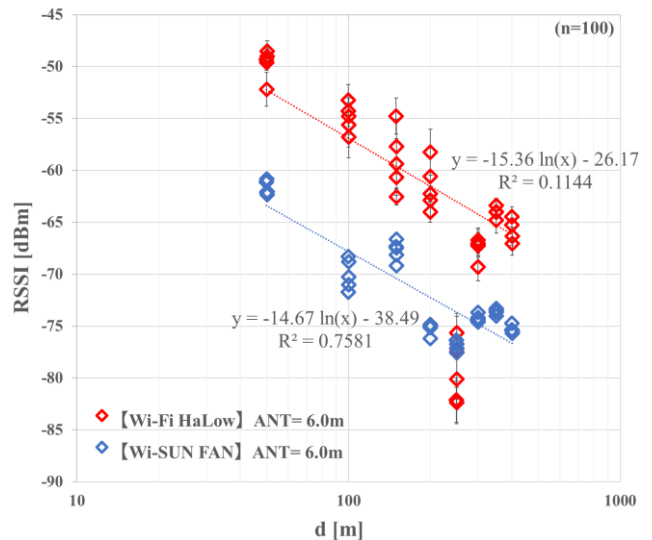


図3 電波伝搬特性の比較 (アンテナ高さ 6.0[m])

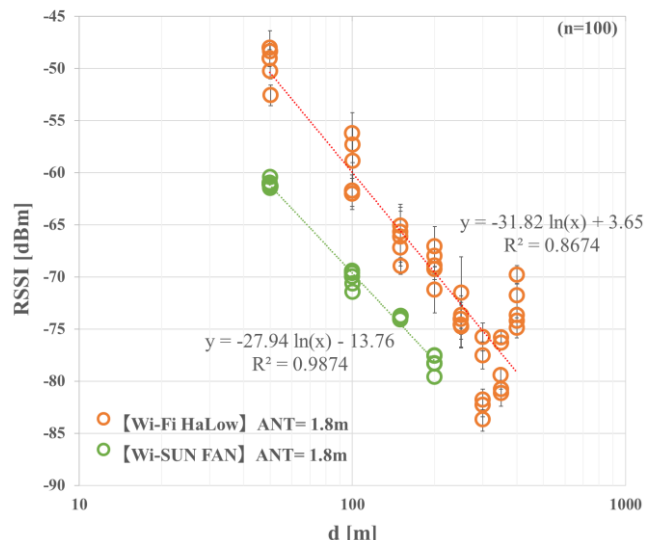


図4 電波伝搬特性の比較 (アンテナ高さ 1.8[m])

高さ 6.0[m]の比較では、Wi-Fi HaLow で式(2)より $\alpha = -15.36$ 、Wi-SUN FAN で式(4)より $\alpha = -14.67$ となった。この理由として、2つの規格の搬送波が同じ 920MHz 帯の電波を使用していることから、搬送波の周波数帯が距離減衰特性の結果に強く影響したと考えられる。

この結果から、電波伝搬の距離減衰特性は、搬送波の周波数に大きく依存するため、通信規格の違いや、変調方式等には依存しないことが分かった。よって、搬送波に 920MHz 帯を使用する LPWA の電波伝搬特性は、通信規格の違いによる影響は非常に小さいと考えられる。

2. 2. 実環境における通信特性評価

2. 2. 1. 実験

ハイテクプラザ実験棟の図面及び Wi-SUN FAN 無線モジュールの配置を図 5 に示す。無線モジュールには、第 1 報と同様、ローム(株)BP35C5⁵⁾を搭載した USB 基板⁶⁾(株)日新システムズ製)に、 $\lambda/2$ ダイポールアンテナを接続して使用した。実験棟及び隣接する機械加工棟に 20 個のノード (Wi-SUN FAN 無線モジュールを搭載した、データ送信を行う子機)を配置し、ボーダールータ (Wi-SUN FAN ネットワークを管理する親機であり、各ノードから送信されるデータの最終到達点)を実験棟から約 23[m]離れた研究管理棟に配置することで、ノード及びボーダールータ間の受信信号強度 RSSI [dBm]を測定した。

ノードの設置場所は、第 3 章で後述するとおり、加工機等の設備稼働状態監視を想定して、加工機・試験機等の側面や上部とした。設置高さは、人手で容易に設置可能な高さ (2.0[m]以下)とし、実験棟内の鉄製扉は全て閉めた状態で測定した。

さらに、各ノードからボーダールータへデータを送信し、ボーダールータで受信したデータパケットのパケットエラーレート (Packet Error Rate, PER [%])を測定した。送信データは第 1 報と同様、ペイロード 4[byte] (32[bit])の UDP パケットを 1[s]間隔で送信し、無線モジュールのデータレート設定は 50[kbps]とした。

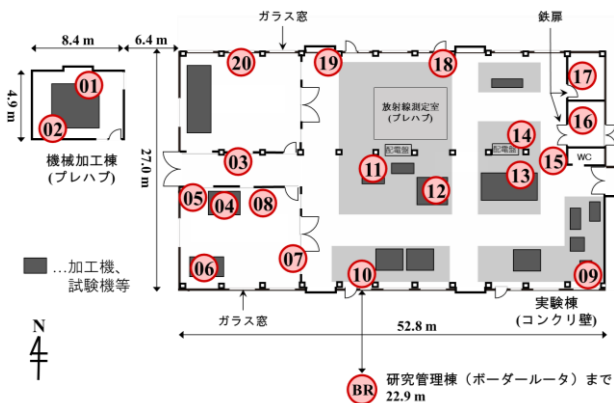


図 5 ハイテクプラザ実験棟図面及びノード配置

ノード間の通信経路は、Wi-SUN FAN のルーティングプロトコルである RPL⁷⁾によって自動生成された経路を使用した。RPL は、マルチホップ通信によるメッシュネットワーク構築をサポートするルーティングプロトコルである。ボーダールータと直接接続できないノードは、他のノードを中継 (ホップ) することで、ボーダールータまでの通信を確立することが可能なプロトコルである。

2. 2. 2. 結果・考察

ノード間の受信信号強度 RSSI [dBm]及び通信経路を図 6 に示す。赤で示したノードは、親機であるボーダールータと直接通信したものであり、青で示したノードは、他のノードを中継してボーダールータと通信したノードである。なお、黒で示した 2 つのノードは、受信信号強度 RSSI [dBm]が極端に低く、ボーダールータで認識できなかったノードを示す。これらのノードは、四方をコンクリート壁と鉄製扉で囲まれた場所に配置したため、電波遮蔽によりボーダールータ及び他のノードで信号を受信できなかったことから、通信経路が設定されなかったノードである。また、矢印はノード間の送信データ経路で、矢印の向きにデータが流れていくことで、最終的にボーダールータまで送信データが到達する。

図 6 から、実験棟内のノードはボーダールータと直接接続、もしくはノードを 1 つ中継した通信 (1 ホップ) によって、Wi-SUN FAN ネットワークが確立したことを確認した。なお、ノード 19 は、物理的な最短経路にあるノード 10 を中継することで受信信号強度 RSSI [dBm]が最大となるが、ノード 9 を中継する経路が設定されている。これは、ノード 10 を中継するノードが 4 つ (ノード 3、6、13、14) あることから、ネットワークトラフィックの負荷分散のため、ノード 9 が中継機として選択されたと考えられる。その他のノードでも、物理的な最短経路が選択されないケースが見られるが、これらも同様に、RPL ルーティングプロトコルにより負荷分散された結果と考えられる。

表 2 に、20 個のノードからデータパケットを 1[s]間隔で送信した際の、パケットエラーレート PER [%]を示す。表中のデータ送信先は、各ノードが直接データ送信する宛先であり、中継ノード数は、各ノードが中継機として他のノードからデータ受信するノード数である。表 2 から、直接ボーダールータへデータ送信するノードの PER [%]が低く、中継器を経由してボーダールータへデータ送信するノードの PER [%]が高い傾向がみられた。

一方、ボーダールータと直接通信するノード 5 は、パケットエラーレートが 100 [%]となった。これは、ノード 5 とボーダールータ間の受信信号強度 RSSI [dBm]低下とネットワーク輻輳のためと考えられる。第 1 報

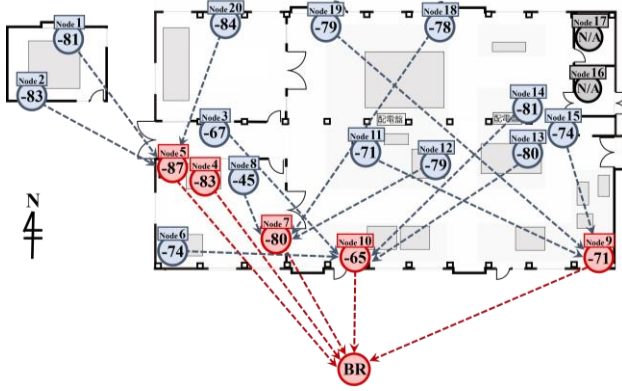


図6 通信経路及び受信信号強度 RSSI [dBm]

表2 データ送信時のパケットエラーレート PER [%]

ノード番号	PER [%]	RSSI [dBm]	データ送信先	中継ノード数
1	100.0%	-80.8	中継ノード	
2	100.0%	-83.1	中継ノード	
3	32.5%	-66.7	中継ノード	
4	4.1%	-83.3	ポータルルータ	0
5	100.0%	-87.3	ポータルルータ	3
6	64.4%	-73.7	中継ノード	
7	3.7%	-79.9	ポータルルータ	3
8	18.0%	-45.1	中継ノード	
9	16.6%	-71.2	ポータルルータ	3
10	3.8%	-64.9	ポータルルータ	4
11	19.4%	-71.1	中継ノード	
12	100.0%	-79.1	中継ノード	
13	33.8%	-79.9	中継ノード	
14	51.8%	-81.0	中継ノード	
15	19.9%	-74.3	中継ノード	
16	100.0%	N/A		
17	100.0%	N/A		
18	23.8%	-77.8	中継ノード	
19	18.0%	-78.7	中継ノード	
20	100.0%	-84.0	中継ノード	

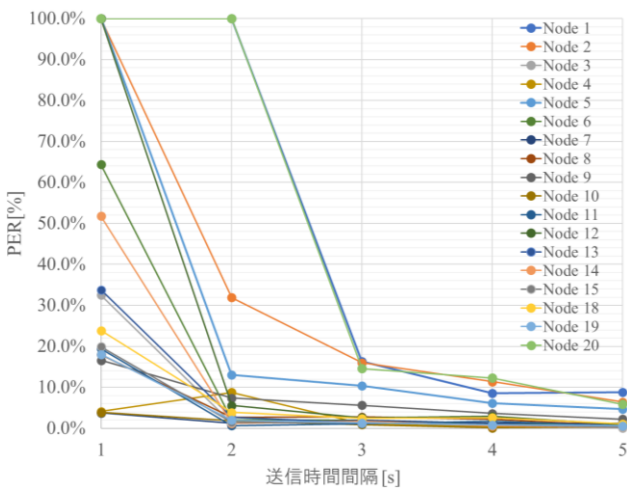


図7 送信時間間隔に対するパケットエラーレート PER [%]

より、1対1のデータ送受信ではRSSI [dBm]が-88 [dBm]以上であればパケットロスなく通信可能であったが、ノード5を中継するノードが3つ（ノード1、2、20）あり、これらのパケットをノード5で中継する必要があることが、RSSI [dBm]が-87.3 [dBm]であるにも関わらず通信できなかった理由と考えられる。また、ポータルルータがすべてのノードから送信される毎秒4 [byte]のパケットを処理しきれず、ポータルルータ側でパケットロスが発生したことも一因であると考えられる。

なお、ネットワークトラフィックを減少させた際に通信が安定するか確認するため、ノードからのデータ送信時間間隔を1 [s]から5 [s]まで変化させた際のパケットエラーレート PER [%]を測定した。結果を図7に示す。送信時間間隔2 [s]まではPER [%]が100 [%]となるノードが複数あるが、送信時間間隔3 [s]からPER 100 [%]を示すノードがなくなり、送信時間間隔5 [s]では、全ノードのPER [%]が10 [%]以下となった。

3. 実証実験

3.1. 概要

これまで、Wi-SUN FANとWi-Fi HaLowの電波伝搬特性や通信信頼性を評価し、基礎的な通信性能を把握した。これらの知見をもとに、製造現場等で運用することを想定した無線通信IoTシステムを構築し、実環境に導入することで、実環境における電波損失やデータ伝送速度及び伝送遅延、マルチホップメッシュネットワーク構築による冗長性等、Wi-SUN FAN無線通信の実現場における通信信頼性評価を行う。

本実験では、工場等に設置された加工機について、稼働状況を遠隔監視することを想定し、実証実験用IoTシステムを構築する。図8に、加工機稼働監視IoTシステム概念図を示す。各々の加工機にWi-SUN FAN無線モジュールを搭載した実験用IoTデバイスを取付け、加工機の稼働状態（動作中、停止、非常停止等）を無線通信により遠隔地へ伝送する。また、稼働状態

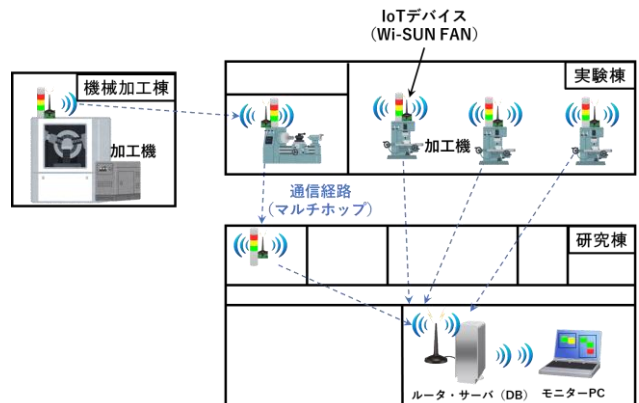


図8 加工機稼働監視IoTシステム概念図

のデータを時系列データベースへ格納するとともに、ダッシュボード機能により稼働状態をリアルタイムで表示するシステム構成とした。これにより、遠隔地から加工機の稼働状態をリアルタイムで確認できるほか、加工機の稼働率算出が可能となり、生産計画作成や需要予測に活用可能となる。

3. 2. 実証実験用 IoT システム構築

3. 2. 1. デバイス開発

加工機に取り付ける実験用 IoT デバイスは、照度センサを加工機の積層灯に取り付けることで稼働状態を読み取り、センサデータをマイコンで処理したうえで、無線モジュールでデータ伝送する設計とした。無線モジュールには BP35C5 搭載 USB 基板、マイコンには Raspberry Pi Pico⁸⁾、センサには波長 550nm に感度のあるフォトトランジスタを使用した。これらを実装した基板を設計、基板加工機を用いて製作し、3D プリンタで造形した筐体に収めたうえで、マグネットで加工機側面及び上部に取り付けた。図 9 に、開発した実験用 IoT デバイスの外観と、加工機積層灯への取付けの様子を示す。

3. 2. 2. システム構成

図 10 に、実証実験用 IoT システムのシステム構成を示す。製造現場等の加工機に取り付けた IoT デバイ



図 9 実験用 IoT デバイス外観と加工機積層灯への取付け

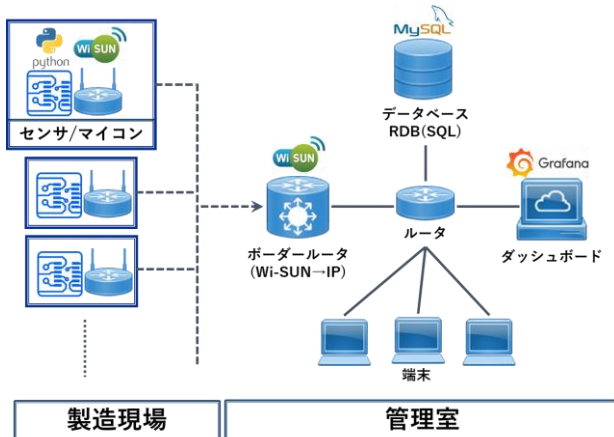


図 10 実証実験用 IoT システム構成



図 11 ダッシュボードの表示画面 (デモデータ使用)

スから、管理室等の遠隔地へ Wi-SUN FAN ネットワークによりデータ伝送し、Wi-SUN FAN ボーダールータで LAN (IP ネットワーク) へ接続する。さらに、IP ルータを介してデータベースへデータ格納し、ダッシュボードからデータベースを参照する。また、IP ルータに接続した端末からダッシュボードへアクセスし、リアルタイムの稼働状態や、稼働状態の履歴を確認できる設計とした。なお、データベース管理システムには MySQL⁹⁾、ダッシュボードはデータ可視化ツールキットである Grafana¹⁰⁾ を使用して開発した。開発中のダッシュボード表示画面を図 11 に示す。

今後は、本システムの開発・実装を行い、ハイテクプラザ施設内で機能検証を行うとともに、実際の工場へ導入し、システム安定性や耐障害性を評価する。

4. 結言

本研究では、製造現場における LPWA 無線の通信特性を明らかにするため、LPWA 無線通信の通信特性評価と、実証実験へ向けた IoT システム構築を行った。

LPWA 無線通信の通信特性評価では、障害物の無い環境における電波伝搬特性評価として、Wi-Fi HaLow 無線モジュールを用いて送受信アンテナ間距離 d [m] に対する受信信号強度 RSSI [dBm] を測定し、電波伝搬の距離減衰特性を明らかにした。また、第 1 報の Wi-SUN FAN の距離減衰特性と比較した結果、LPWA 無線通信における電波伝搬特性は、通信規格の違いによる影響が非常に小さいことが分かった。

実環境における通信特性評価として、ハイテクプラザ施設内に Wi-SUN FAN メッシュネットワークを構築し、受信信号強度 RSSI [dBm] を測定するとともに、複数ノードからデータ送信した際のパケットエラーレート PER [%] を測定した。結果、RPL ルーティングプロトコルによる負荷分散を考慮したネットワーク経路最適化を確認し、実環境におけるパケットロス発生の傾向を確認した。また、データ送信時間を変化させてパケットエラーレート PER [%] を測定することで、送信時間

間隔 5[s]では、全ノードの PER[%]が 10[%]以下となることを確認した。

さらに、実証実験へ向けた IoT システム構築では、IoT デバイス設計開発と IoT システム概念設計及びシステム構築を行った。

今後は、LPWA 無線通信の電波伝搬特性について、障害物による遮蔽や回折、干渉等の影響を評価し、製造現場への LPWA 無線通信導入の指針を得る。また、実証実験用 IoT システムの開発・実装を行い、ハイテクプラザ施設内で機能検証を行うとともに、実際の工場へ導入し、システム安定性や耐障害性を評価する。

参考文献

- 1) 柿崎正貴, 鈴木健司, 通信障害に強い無線通信ネットワークの製造現場適用化研究 (第 1 報), 令和 4 年度試験研究報告書, 福島県ハイテクプラザ, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/579290.pdf>, (参照 2024-2-24).
- 2) “Products | NRC7292”, Newracom, <https://nnewraco.com/ja/products/nrc7292> (参照 2024-2-24).
- 3) “SX-NEWAH 日本モデル | IEEE 802.11ah(Wi-Fi HaLow™)対応 SPI 無線 LAN モジュール | サイレックス・テクノロジー株式会社”, サイレックス・テクノロジー (株), <https://www.silex.jp/products/wireless-module/spi/sxnewah> (参照 2024-2-24).
- 4) “Raspberry Pi 4 Model B”, Raspberry Pi Foundation, <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (参照 2024-2-24).
- 5) “BP35C5 : Wi-SUN Module”, ROHM Co., Ltd., https://fscdn.rohm.com/jp/products/databook/datasheet/module/power_module/specified_low_power/bp35c5-j.pdf, (参照 2024-2-24).
- 6) “Wi-SUN 搭載 USB 基板”, (株) 日新システムズ, https://www.co-nss.co.jp/products/download/catalog/catalog-wisunfan_usbboard.pdf, (参照 2024-2-24).
- 7) “RFC 6550 - RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks”, Internet Engineering Task Force (IETF), <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6550> (参照 2024-2-24).
- 8) “Raspberry Pi Pico”, Raspberry Pi Foundation, <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/> (参照 2024-2-24).
- 9) “MySQL”, Oracle, <https://www.mysql.com/jp/> (参照 2024-2-24).
- 10) “Grafana: The open observability platform | Grafana Labs”, Grafana Labs, <https://grafana.com/> (参照 2024-2-24).