

BLE ビーコンを用いた移動型 IoT デバイスの 位置情報の精度改善

太田 康平^{1,a)} 串田 高幸¹

概要：近年、位置情報認識ソリューションを使用する IoT システムが増加している。しかし、GPS を使用した位置情報システムでは電波の届かない場所のデバイスの位置の把握が困難である。本研究では非常に低電力で稼働する BLE ビーコンの RSSI データをもとにデバイスの位置情報をクラウド内でマッピングを行い、そのデバイスの位置情報が記されたマップデータをユーザー側で常時把握可能なシステムを提案する。

1. はじめに

1.1 背景

現在、IoT(Internet of Things) 社会が進む中、位置測位ソリューションが重要な技術の一つになっている。私たちがモノの位置情報を知りたいとき、対象が屋外にあるときは衛星を利用した GPS(Global Positioning System) を使用して位置情報を得ることが可能である。しかし、モノが屋内にある場合では GPS を使用した位置情報の取得は電波が届かず、正しい位置情報を得ることが難しい。そのため、位置情報の対象が GPS 電波の届かないところにある場合は、屋内測位の技術を用いて位置情報を得ることが可能になる。屋内測位の技術は次のようなものがある。

RFID タグを観測対象につけて位置を特定する方法 [1]、様々な方向から超音波を発してデバイス側で超音波を受信して位置を割り出す方法 [2]、画像処理アルゴリズムによる位置認識を使用する方法 [3]、WiFi のアクセスポイントや BLE(Bluetooth Low Energy) ビーコンの受信信号強度である RSSI(Received Signal Strength Indicator) のデータをもとに位置情報を得る方法がある [4][5]。特に Bluetooth はスマートフォンやウェアラブルデバイスの普及により、近年、IoT システム開発に BLE の採用が増加している。また、BLE は一般的に普及している Bluetooth Classic に比べ、消費電力を最小限に抑えられている [6]。

IoT デバイスは動的なデバイスや静的なデバイスが普及してきた、IoT デバイスは温度センサや監視カメラ、人感センサなどを用いたアクチュエータ用途の静的なデバイスやウェアラブルデバイスやドローン、スマートキーなどの

移動してしまう動的なデバイス、監視やデータ観測目的やスマートハウス家電やビルディングオートメーションのシステムに用いられている静的なデバイスがある。静的なデバイスは基本的に位置は固定されており、ユーザーにセンサによって得られた情報を提供している。動的なデバイスは Bluetooth のインフラストラクチャが構成されているものが多く、人やモノに接続する機会が多い。こうしたことで、私たちの生活の中で数多の Bluetooth の電波が飛び交っている。IoT デバイスからの Bluetooth の電波を別のデバイスによる Bluetooth のスキャンプログラムにより、RSSI データとして得ることが可能であり、得られたデータを屋内測位を行う際に活用することも可能である。

IoT デバイスは常時ネットワークに接続しているため、ユーザーが自身のデバイスからのセンサ情報を知りたい場合、別の場所にあるスマートフォンやパソコンを利用して Web サーバーを通じてセンサ情報を得ることが可能である。IoT デバイスは温度センサやカメラを駆使し、建物の火災検知や物体検知を行い別の場所にいる私たちに情報を通知し、日常生活に役立てられている [7]。しかし、デバイスを使用した IoT システムからの正しい情報を得るにはデバイスが正しい位置に存在し続ける必要があるため、ユーザーとサービス提供の精度を高めるにはデバイスの位置を常に把握し続けることが重要である。

1.2 課題

1.1 で述べた通り、IoT システムにおけるデバイスで精度の高いセンサデータを得るにはデバイスが正しい位置に常に設置されている必要がある。ユーザーとデバイスとの距離が離れている場合、デバイスの位置を把握することは困難である。デバイスが何らかの原因で本来あるべき場所から

¹ 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

^{a)} C0117066

ずれてしまった場合、ユーザーはデバイスがずれてしまったことに気が付かないまま誤ったデータを取得してしまうことが多い。また、デバイスがGPSの電波の届かない屋内にある場合、様々な環境に適応可能な屋内測位システムを採用する必要がある。

2. 関連研究

現在、屋内測位の手法はRFIDタグを位置情報の観測対象に貼り付け、専用リーダーで読み取ることで得られた情報をもとに位置情報を割り出す方法 [1]、超音波を利用した方法 [2]、WiFiのアクセスポイントからのRSSIをもとに測位を行う方法 [4]、BLEのビーコンからのRSSIを利用した方法がある [5]。また、それぞれ屋内測位の手法を比較した研究が行われている。超音波利用した方法は障害物の影響を受けやすく精度の点では他の方法に劣る。RFIDタグは精度は良いが、観測したいデバイスにタグを付けなければならないうえ、専用のリーダーが必要なためコストがかかる [8]。WiFiを利用した測位は導入コストは低いがアクセスポイントが少ないと精度が落ちる。また、アクセスポイントの数に限界があるため、システムの拡大に柔軟性がない [9]。BLEビーコンを使用した方法はデバイスのBluetoothに対応している必要があるが、BLEビーコンの導入コストが安く非常に低電力でシステムの稼働させることができる。

屋内測位はユーザー体験の向上にも利用されている。博物館のウェアラブルデバイスを身につけた訪問者をBLEビーコンを用いてトラッキングする。ユーザーが展示物の前に到達したとき、身につけているデバイスがその展示物の説明を行うシステムがある [10][11]。

BLEビーコンを用いた屋内測位は三点以上のBLEビーコンを用いて対象物のマッピングを行うことが一般的な手法である。また、BLEビーコンとWiFiのアクセスポイントを組み合わせることで屋内測位を行うものも存在する [12]。BLEビーコンを用いて移動物体に対する距離の推定も可能であり、位置情報の精度向上につながる [13]。

3. 提案

今回提案するシステムは1.2で述べた課題を解決するため、移動してしまう可能性があるアクチュエータや監視目的で屋内に設置済みのIoTデバイスを3つのBLEビーコンを用いた三点測位で位置情報を特定し、クラウド上のサービスでデバイスの監視を続ける。IoTデバイスの位置情報がずれてしまった場合、クラウド上のサービスからユーザーに通知を発信するシステムである。また、ユーザーからはデバイスの部屋のどこにあるのか分かるようにMapデータをユーザーのスマートフォンやパソコンで表示可能なWebページにデバイスをプロットしたMapデータを送信する。システムの前提としてIoTデバイスはBluetooth

のセントラルとして用いて電源が入っている限り、使用可能であること、BLEビーコンの位置は固定されていること、IoTデバイスは電源が入っている限りWiFiが使用可能であること。ユーザーとIoTデバイスは同じ場所に存在しないことである。こうした条件をもとにシステム全体の構成図を図1に示す。

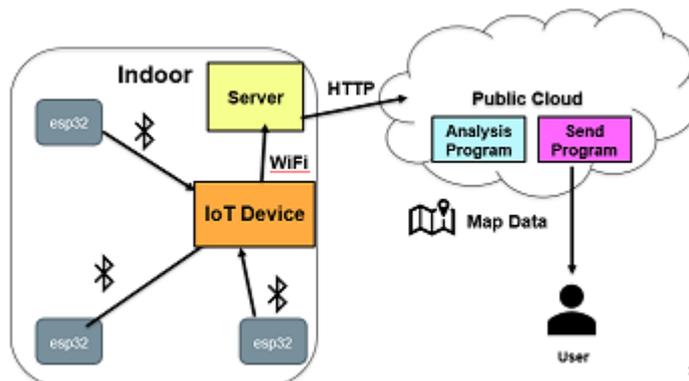


図1 システムアーキテクチャ

図1のIndoorでは屋内に配置されているデバイスを示している。今回BLEビーコンとして用いるのはEspressif Systems社が開発したマイクロコントローラであるESP32である。ESP32はBLEに対応しているため本システムに採用した。ESP32を屋内の三か所に配置し、BLEビーコンとして電波発生し続ける。また、ESP32から発せられるRSSIデータを受け取るのはIoTデバイスであり、IoTデバイスが受け取ったRSSIデータはWiFiを通じてデータベースサーバに受け渡される。RSSIデータが格納されているデータベースをもとにAnalysisプログラムがデバイスと位置情報の解析を行い、その後Sendプログラムがユーザーに情報を通知をするとシステムになる。

4. 実装と評価

4.1 実装

図2にESP32からのRSSIデータの流れを示す。

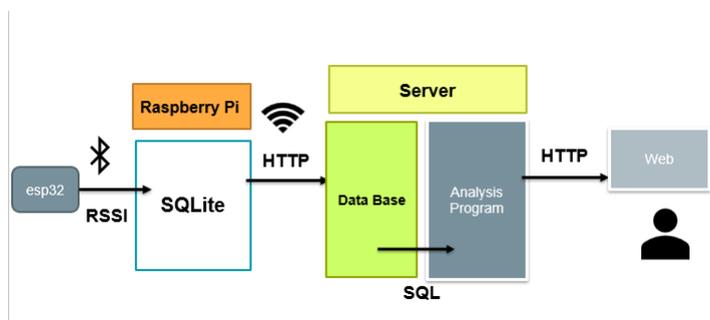


図2 RSSIデータの全体の流れ

位置情報の観測対象となるIoTデバイスはBluetoothに対応したRaspberry Pi Zero WHを採用した。Raspberry PiでRSSIデータの検出行い、軽量のデータベースである

SQLite に RSSI データを一度蓄え、WiFi を使用して Json 形式でデータ解析を行うサーバのデータベースに随時送信し、格納する。また、Analysis プログラムでデータベースに格納している RSSI データをもとに位置情報の解析を行い、ユーザーに Web 形式で通知を発信する。

IoT デバイスの移動

観測対象である IoT デバイスは位置情報を更新するために移動させる必要がある。図 3 に IoT デバイスの移動判定の方法を示す。

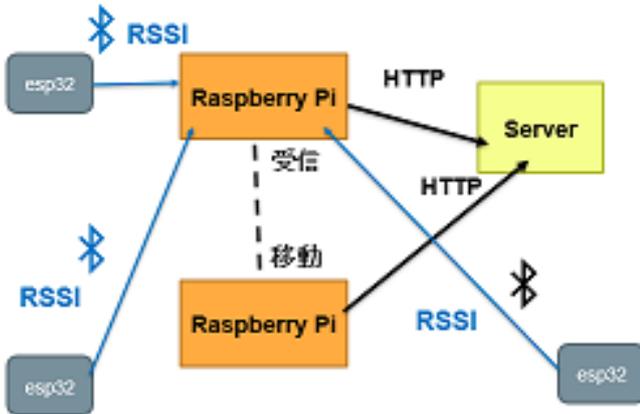


図 3 IoT デバイスの移動判定

Raspberry Pi 内の RSSI データの検知しているプログラムが常に 3 台の ESP32 からの RSSI を取得し続けている。また、HTTP 形式でサーバに RSSI データを送信するのはシステムが稼働した時と Raspberry Pi の位置情報に変化があった場合のみ行われる。位置情報の変化の判定は Raspberry Pi のプログラムで RSSI データの変化の閾値をもとに判別する。もし変化があった場合、図 2 のようなシステムでユーザーに通知が発信される。なお、今回の実験では IoT デバイスを 5cm 以上手で動かして行う。

RSSI からメートルへの変換

Raspberry Pi で得られる RSSI の値をメートル表記に変換する式を 1 に示す。電波は逆 2 乗の法則に従って伝播するため、障害物の干渉を受けない限り距離を導き出すことが出来る。

$$RSSI = -10n \log_{10}(d/d_0) + A_0 \quad (1)$$

d が ESP32 と Raspberry Pi との距離、 n が環境に依存する伝播指数、 A が参照する RSSI データを示している。この計算式をもとに図 2 の本システムの Analysis プログラムで IoT デバイスの位置情報を割り出している。RSSI データから距離への計算は Raspberry Pi 内ではなくサーバで計算プログラムを実行する。

デバイス間の Bluetooth 通信

一般的に Bluetooth アーキテクチャの搭載されたデバイス間の通信はセントラルとペリフェラルの 2 つの役割が確立する。

セントラル

Bluetooth 通信において通信のホストとなるデバイス。ペリフェラルに対して要求を出す。一般的にはスマートフォンやパソコンに当たる。

ペリフェラル

セントラルによって定められたタイミングでデータの送受信を行うデバイス。

今回の実装では Raspberry Pi がセントラルに、ESP32 がペリフェラルに該当する。なお、デバイス間の通信はペリフェラルからの一方向通信であり、セントラルからは電波強度の読み取りのみを行う。

デバイスごとのプログラム

BLE ビーコンとしての ESP32 のプログラムファイルと Raspberry Pi 内のプログラムファイルを図 4 に示す。

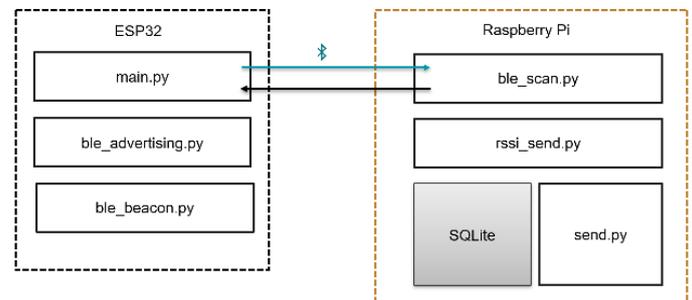


図 4 ESP32 と Raspberry Pi 内のプログラム

ESP32 のファイルはすべて micropython で開発をしている。ESP32 は main.py のファイルは本体の電源が入っている限り、常に稼働しているプログラムである。ble.advertising.py で esp32 をビーコンとしてペリフェラルの状態にしている。ble.beacon.py は RSSI データのみ検出が出来るようにし UUID や検出される名前の設定を行う。main.py で ble.beacon.py の機能を呼び出して常にプログラムが稼働している状態にする。

Raspberry Pi 内のプログラムでは ble_scan.py で周辺の Bluetooth デバイスの検出行い、ESP32 のみの RSSI データを選出する。rssi_send.py では ble_scan.py によって得られた RSSI データを SQLite データベースに送信する。send.py では SQLite に蓄えてある RSSI データをサーバに送信する。

4.2 実験環境

本研究の実験は東京工科大学研究棟 A910 の部屋で行った。RSSI データを受信するセントラルデバイスとして Raspberry Pi WH, Bluetooth の電波を発するペリフェラルデバイスとして ESP32 を使用した。Raspberry Pi と ESP32 の間には障害物がないように設置した。

ソフトウェア環境は 4.1 で記述した通り、ESP32 に micropython でコードを組み込んだ。Raspberry Pi では Python の Bluetooth ライブラリである bluepy を使用して scan.oy で ESP32 の RSSI データを取得をする。

4.3 評価

4.1 で示した Raspberry Pi 内の ble_scan.py で実行し、ESP32 の Public Address や Local Name の情報を取得した。実行結果を図 5 に示す。

```
=====
address : fc:f5:c4:29:05:4e
addrType: public
RSSI    : -55
Adv data:
( 1) Flags : 06
( 9) Complete Local Name : beacon1
( 3) Complete 16b Services : 0000181a-0000-1000-8000-00805f9b34fb
( 25) Appearance : 0003
=====
```

図 5 ble_scan.py の実行結果

今回は ESP32 の内のプログラムの ble_beacon.py で Local Name を beacon1 という名前に設定したため、検出が成功している。また、ESP32 の RSSI データは -55dBm と表示されている。この得られた RSSI データと 1 の式を用いることでデバイス間の距離を割り出すことが可能である。しかし、本研究の性質上 IoT デバイスである Raspberry Pi の位置情報を随時読み取る必要がある。なのでデバイス間の位置固定し RSSI データにどれほどの差が出るかを Raspberry Pi のスキャンプログラムを 5 回実行し、得られたデータを表 1 に示した。

表 1 Raspberry Pi で 5 回スキャンした ESP32 の RSSI データ

	RSSI [dBm]
1 回目	-55
2 回目	-56
3 回目	-55
4 回目	-60
5 回目	-57

得られた RSSI データは最大で 5dBm の差が出ていた。このため、より正確な位置情報を取得するためには一定数の RSSI の平均値をもとに行う必要があるだろう。

5. 議論

本研究で実装した Raspberry Pi の ble_scan.py で得られた ESP32 の RSSI データは、位置を固定していてもデータ

にばらつきがある。そのため、今後の実装において 1 分間のスキャンごとの平均値を出して位置情報の精度向上に見込みがあるか検証する必要がある。また、デバイスの移動判定は 5cm 以上移動した場合に変化の判定が出るが、4.3 であったように RSSI データのスキャンごとに値の差があることを考慮して閾値を定めることも必要である。

6. おわりに

本研究では BLE ビーコンから発信している RSSI データを IoT デバイスの位置情報を取得し、IoT デバイスの位置情報の変化があった場合にユーザに情報を通知するシステムを提案した。BLE ビーコンとして用いている ESP32 は Bluetooth だけでなく 2.4GHz の WiFi も使用できる。そのため、BLE ビーコンとしてだけでなく、WiFi のアクセスポイントの RSSI も発信できる上、micropython で Bluetooth の電波の発信するタイミングを制御可能であるのでシステム拡大の柔軟性が高い。

このような屋内測位技術を用いた IoT デバイスの管理手法はビーコンが非常に低コストなため、監視カメラに比べシステム導入のコストパフォーマンスに長けている。そのため、一般家庭に普及しやすく IoT 社会の拡大につながるだろう。

参考文献

- [1] Seco, F., Plagemann, C., Jiménez, A. R. and Burgard, W.: Improving RFID-based indoor positioning accuracy using Gaussian processes, pp. 1–8 (2010).
- [2] Hsu, C., Chen, H. and Lai, C.: An Improved Ultrasonic-Based Localization Using Reflection Method, *2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pp. 437–440 (2009).
- [3] Kiliç, O., Küçükçildiz, G., Karakaya, S. and Ocak, H.: Image processing based indoor localization system, *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1654–1657 (2014).
- [4] Wu, F., Xing, J. and Dong, B.: An Indoor Localization Method Based on RSSI of Adjustable Power WiFi Router, *2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, pp. 1481–1484 (2015).
- [5] Kaczmarek, M., Ruminski, J. and Bujnowski, A.: Accuracy analysis of the RSSI BLE SensorTag signal for indoor localization purposes, *2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedC-SIS)*, pp. 1413–1416 (2016).
- [6] Ensworth, J. F. and Reynolds, M. S.: BLE-Backscatter: Ultralow-Power IoT Nodes Compatible With Bluetooth 4.0 Low Energy (BLE) Smartphones and Tablets, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 65, No. 9, pp. 3360–3368 (2017).
- [7] Gu, S., Yue, Y., Maple, C., Wu, C. and Liu, B.: Challenges in mobile localisation in wireless sensor networks for disaster scenarios, *2013 19th International Conference on Automation and Computing*, pp. 1–6 (2013).
- [8] Tolín, E., Vipiana, F., Bruni, S. and Bahr, A.: Polarization Reconfigurable Patch Antenna for Compact and

- Low Cost UHF RFID Reader, pp. 128–130 (2019).
- [9] Yun, Y., Lee, J., An, D., Kim, S. and Kim, Y.: Performance Comparison of Indoor Positioning Schemes Exploiting Wi-Fi APs and BLE Beacons, *2018 5th NAFOS-TED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, pp. 124–127 (2018).
 - [10] Alletto, S., Cucchiara, R., Del Fiore, G., Mainetti, L., Mighali, V., Patrono, L. and Serra, G.: An Indoor Location-Aware System for an IoT-Based Smart Museum, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 244–253 (2016).
 - [11] Spachos, P. and Plataniotis, K. N.: BLE Beacons for Indoor Positioning at an Interactive IoT-Based Smart Museum, *IEEE Systems Journal*, pp. 1–11 (2020).
 - [12] Qureshi, U. M., Umair, Z. and Hancke, G. P.: Indoor Localization using Wireless Fidelity (WiFi) and Bluetooth Low Energy (BLE) signals, *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 2232–2237 (2019).
 - [13] Lam, C. H. and She, J.: Distance Estimation on Moving Object using BLE Beacon, *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 1–6 (2019).