

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、位置情報を使用する IoT システムが増加している。しかし、位置情報を取得したいデバイスが電波の届かないところにあるとは限らないため、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 ビーコンを屋内の部屋に複数台配置しそれぞれ BLE ビーコンの RSSI データをもとにクラウド上のサーバで IoT デバイスの三点間測位で位置情報の分析を行う。そして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

背景

ここ数年間で、IoT(Internet Of Things) デバイスの普及が進み一般家庭や公共施設、飲食店などで設置されている。IoT デバイスは WiFi や Bluetooth 技術が搭載されており、それらの電波を利用してセンシングした情報をデバイス間やクライアント、サーバへ送信される役割を果たしている。Bluetooth4.0 の BLE(Bluetooth Low Energy) の登場により IoT デバイスは消費電力を抑えることが可能になり、多くのデバイスに搭載されている。その技術により、IoT システムの普及が拡大した [1]。

位置認識技術は IoT システムにも使用されることが多く、一般的に地図アプリケーションやナビゲーションシステムに使用されている。これらのシステムは一般的に GPS(Global Positioning System) を利用してデバイスの位置情報を得ることが可能としている。しかし、位置情報を取得したいデバイスが地下鉄の駅やトンネル内では GPS の電波が届かず位置情報を得ることが出来ない。このような GPS の不利な点を補うため、電波の届かない場所にデバイスがある場合は屋内測位の技術が必用となる。屋内測位システムは近年、IoT システムにおいて必要性が高まり、多くの研究開発が行われている。屋内システムは BLE ビーコンや WiFi の受信電波強度である RSSI(Received Signal Strength) を利用して三点間測位を行いデバイスの位置情報を得る方法や、RFID(Radio Frequency Identification)

といった RF タグを観測対象のデバイスに装着することで近距離無線通信を行い、位置情報を得る方法がある。特に BLE ビーコンを使用した方法は導入コストが低く、消費電力も低いいため IoT システムに採用されることが多い。

IoT デバイスはカメラモジュールセンサーや人感センサー、超音波距離センサを常時設置することで防犯や農業の作業の自動化により監視目的で設置されているものが普及している。監視目的の IoT デバイスは設置されている場所を固定化する必要があり、使用者が管理するにはデバイスの設置されている場所にいる必要があり、デバイスの位置情報を管理するには現場に確かめに行かなければならない。そのため、現場以外の場所からデバイスの位置情報を得るためには、監視目的の IoT デバイスがネットワークに接続し、サーバを通じて位置情報を得ることが出来る。

また、ドローンやお掃除ロボットといった動的な IoT デバイスが普及してきた。それらの位置情報も管理システムが必要としている [2][3]。それらのデバイスも Bluetooth インフラストラクチャが構成されているため瞬時に位置情報を得ることが可能になっている。

課題

背景で述べたように、IoT デバイスは GPS のトンネルや地下鉄の駅といった電波の届かないに設置されいる場合正しい位置情報を得ることが難しい。そのため、屋内測位技術を採用することによりデバイスの位置情報を得ることを可能にする。また、監視目的の IoT デバイスはセンサーが基本的に接続されており、そのデバイス自身が動物や災害や突風により、設置した位置より大幅にずれてしまった場合がある。ユーザーがそのことに気づかずに誤ったセン

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

センサーデータを IoT デバイスから受信してしまう可能性がある。ユーザーは基本的にネットワークを通じてセンサーデータを受信しているため、デバイスの設置している現場にはおらず、位置情報を直接確認しに行かなければならない。

これらの課題を解決するため、この論文では屋内測位技術を使用した IoT デバイスの移動の可能性を考慮した位置情報を管理するシステムを提案する。

各章の概要

第 2 章では屋内測位技術の関連研究について述べ、第 3 章では提案するシステムの手法について述べる。第 4 章では提案したシステムの実装や実験環境について述べ、第 5 章では実験結果についての評価と分析、第 6 章では提案したシステムの議論を行い、7 章でまとめに入る。

2. 関連研究

デバイスの位置情報を取得するのは、IoT デバイスが数多く普及してそれらを利用するアプリケーションにとって必要不可欠である。この章では、屋内測位の手法と提案するシステムで使用する Bluetooth の技術を使用した方法以外の方法を紹介する。

まず初めに WiFi の RSSI データを使用した方法を紹介する。都市部のワイヤレスアクセスポイントの増加を伴い、屋内測位の手法として注目されてきた。手法としては BLE と同様に、位置情報を観測するデバイスが WiFi のアクセスポイントから発信されている RSSI を利用して、ユーザーのデバイスを位置情報を特定可能である [4]。WiFi を利用した屋内測位の手法は一般的だが、BLE ビーコンより消費電力が高いうえ、WiFi のアクセスポイントは屋内測位を行うために最適化された配置方法ではないため、位置情報の精度が期待できない。

次に RFID タグを利用した方法を紹介する。RFID タグは近年バーコードスキャナの代用として使用されることが多い。タグを商品に装着することでバーコードスキャナより読み取ることが可能である。RFID タグはスキャナ以外にも屋内測位の手法としても採用されている。RFID タグは観測対象のデバイスの装着し、常に短いパルスを送信される。タグから発信されるパルスを受信する専用のリーダーを天井や壁に設置することで、デバイスの位置情報を解析することが可能である [5]。しかし、観測したい対象全てにタグを装着しなければならない。加えて、専用のリーダーを観測したい場所に複数台設置しなければならないので BLE ビーコンに加えてコストがかかる。

超音波信号を利用した方法も屋内測位の手法の 1 つである。手法としては超音波センサーを床や天井、壁に超音波センサーを配置し、超音波を発信し続ける。観測対象のデバイスは上下左右から発信された超音波を受信し、位置情

報を解析する [6]。しかし、超音波は湿度により変化があり、障害物の影響が大きいので、精度に期待できない。

他にも画像認識技術を利用した屋内測位の方法もある [7]。BLE ビーコンを使用した屋内測位の手法は、上記の手法と比較してシステムの導入コストが低いため、多くの IoT システムに採用されてきた [8]。BLE ビーコンはサイズが小さく、電力効率が高いため、システムの柔軟性が高い。そのため、BLE ビーコンと WiFi のアクセスポイントの RSSI を共有した屋内測位の手法の研究開発も行われている [9]。また、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 [10]。

3. 提案

この章では 1 で述べた課題を解決するために BLE が搭載されたビーコンを 3 台以上用いて IoT デバイスを三点間測位を行い、監視目的やアクチュエータ用途の IoT デバイスの位置情報に異常が見られた場合のみユーザーにデバイスの現在の位置を示す。IoT デバイスの位置情報はクラウドサーバ上で解析を行い、デバイスの位置をマップデータとしてユーザーのデバイスに送信される。システムの前提条件としてユーザーのデバイスは IoT デバイスと違うフロアに存在する。また、観測対象の IoT デバイスは BLE ビーコンの電波のみ受信し、WiFi に常に接続可能な状態である。

3.1 屋内測位の制御システム

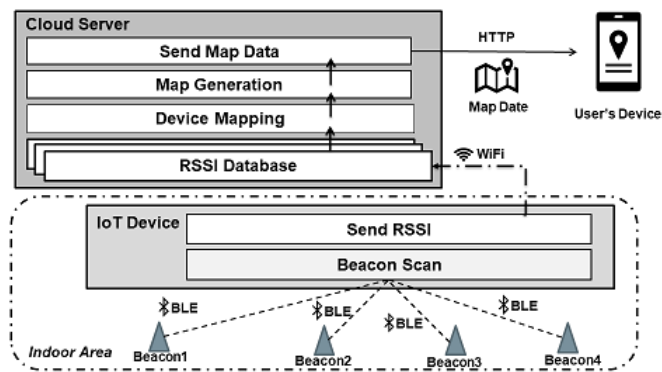


図 1 システム構成図

図 1 では提案されたシステムの全体の構成図となっている。屋内のフロアに BLE ビーコンを 4 つ以上用意し、常にアドバタイジングの状態ではビーコンの間隔を 5 m 以上離して設置する。IoT デバイスは常に BLE ビーコンをスキャンし、クラウドサーバ上のデータベースにそれぞれのビーコンの RSSI データを送信する。IoT デバイスから送信された RSSI データは、クラウドサーバ上のそれぞれのビーコンの RSSI データを格納するデータベースに格納される。クラウドサーバ上でそれらのデータをもとに三点間

測位で IoT デバイスの位置情報を解析する。三点間測位のプロセスは位置情報の精度を高めるために、最低4つ以上ビーコンの RSSI データを使用して行う。そして三点間測位で得られた結果をもとに IoT デバイスがプロットされたマップデータを作成し、ユーザーのデバイスであるスマートフォンやウェアラブルデバイスに転送される。

3.2 三点間測位

提案するシステムで IoT デバイスの位置を定めるのに三点間測位の方法を用いる。本システムでは IoT デバイスの BLE ビーコンのスキャンプロセスで得られた RSSI データを使用する。

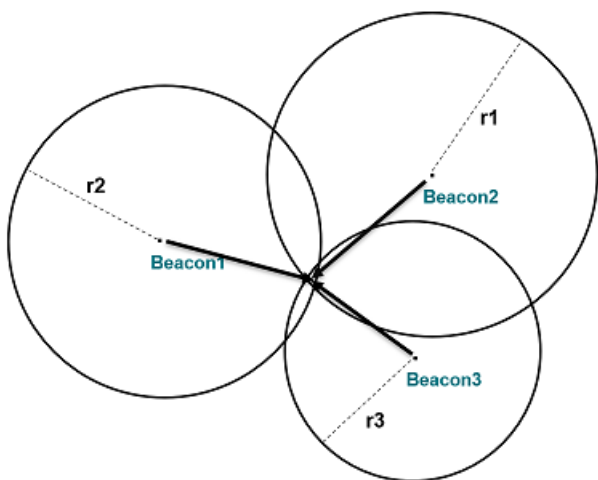


図 2 三点間測位の例

図 2 では三点間測位の例を示している。それぞれ3つの BLE ビーコンを中心に RSSI データを半径 (r_1, r_2, r_3) とし、円を描く。3つの円の交点が IoT デバイスの位置情報として定められる。また、BLE ビーコンはすべて同じ送信電力で電波強度は同一に設定する。三点間測位はビーコンの数が多くなるほど、精度が向上するので、IoT デバイスの位置情報を定める際は、3つの円の交点では精度が低いので本システムでは測位に使用可能な BLE ビーコンをすべて用いての円の交点で IoT デバイスの位置情報を定める。

RSSI の使用方法

RSSI データを使用する屋内測位システムでは、BLE ビーコンから IoT デバイスに送信された信号をもとに RSSI データを距離に変換してマッピングを行う。

IoT デバイスのスキャンプロセスで得られる BLE ビーコンの 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搬するため、障害物の干渉を受けない限り距離を導き出すことが可能である。

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

d が BLE ビーコンと IoT デバイスとの距離、 n が環境に依存する伝搬指数、 A_0 が参照する RSSI データを示している。伝搬指数は $n = 2.0$ が障害物のない理論上の空間に適した値である

なお、RSSI データの計算は図 1 のサーバ上のデバイスマッピングのプロセスで行われる。

3.3 IoT デバイスの移動

提案するシステムでは、観測対象の IoT デバイスが移動することを前提としているので移動の判別をシステム上で行う必要がある。

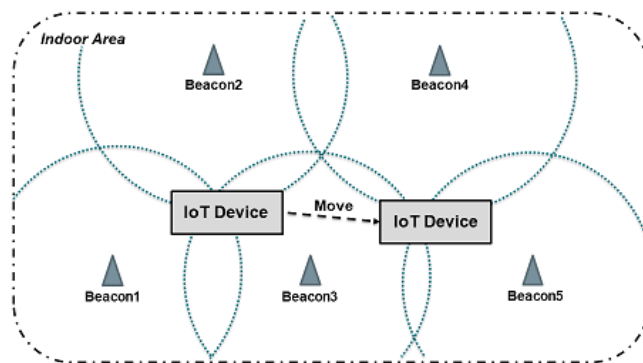


図 3 IoT デバイスの移動判別

図 3 は屋内のフロアに BLE ビーコンを 5 つ以上配置され、IoT デバイスが 1 台設置されている。IoT デバイスが移動する判定は BLE ビーコンからの RSSI データによって行われる。IoT デバイスの初期位置は Beacon1 と Beacon2, Beacon3 の 3 点間で測位を行っている。移動した後の IoT デバイスは Beacon1 と Beacon2 の RSSI は検出できないため、Beacon3 と Beacon4, Beacon5 の 3 点間で測位を行う。例として BLE ビーコンを 3 つ採用しているが、実際に三点間測位の BLE ビーコンは多いほど位置情報の精度がこうじょうするため、IoT デバイスが検出できる限り使用する。また、検出できなかった BLE ビーコンはデータベース内には送信されない。

4. 実装と実験環境

この章では、提案するシステムで使用したハードウェアとソフトウェアについて説明する。

4.1 実装

本システムで使用したハードウェアは BLE ビーコンとして Espressif Systems 社が開発したマイクロコントローラである ESP32 を 5 台使用し、IoT デバイスとして Raspberry pi Zero WH を採用した。IoT デバイスの位置情報の解析するサーバとして OS を Ubuntu 18.04 に Web サーバソフトウェアの Apache2 を採用した。

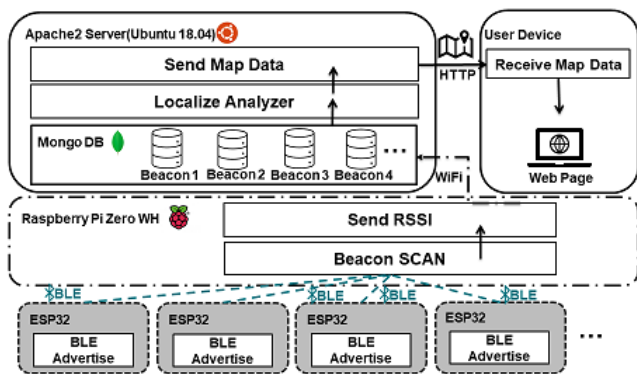


図 4 屋内測位システムの実装

図 4 は図 3 で示したシステムをもとにして実装したシステム構成図である。BLE ビーコンとして使用している ESP32 は組み込み用の言語である Micro Python をしている。BLE ビーコンには BLE をアダプタイジングの状態にするプログラムと BLE ビーコンの判別を行うために名前を設定や UUID の設定を行った。また、ESP32 は電源を入れている限り、BLE ビーコンとして機能する状態であり、すべての ESP32 には同様のプログラムが組み込まれている。

IoT デバイスとして使用している Raspberry pi Zero WH はビーコンスキャンのプロセスで BLE ビーコンの RSSI データを 3 秒に 1 回スキャンする。BLE ビーコンの判別は MAP アドレスで行っている。RSSI データを送信するプロセスは、BLE ビーコンをスキャンした RSSI データをスキャンプロセスが実行されるごとにサーバ上のデータベースに送信される。なお、BLE ビーコンをスキャンするプロセスとデータベースに RSSI データを送信するプロセスは電源を入れている限り繰り返し実行される。

サーバ内の IoT デバイスの位置情報解析を行うために RSSI データを格納するデータベースとして MongoDB を採用した。データベース内は BLE ビーコン 1 台ごとにコレクションを設置し、スキャンした日時とその時点の RSSI データがそれぞれ格納されている。位置情報解析のプロセスでは格納されたデータベースから RSSI データを使用して、IoT デバイスの位置情報の解析を行う。その後、ユーザーが事前に登録したマップデータ上に IoT デバイスをプロットしマップデータをユーザーのデバイスが受け取り、Web ページ上で表示される。

4.2 実験環境

システムの実験を行う前に IoT デバイスを 3 点間測位の精度を高めるため、予備実験として IoT デバイスと BLE ビーコンの 2 点間の距離を計測する実験を行った。実験に使用するデバイスは 4.1 と同様に IoT デバイスとして Raspberry pi Zero WH、BLE ビーコンとして ESP32 を 1 台使用した。

実験内容は図 5 のように BLE ビーコンの位置を固定し、IoT デバイスの位置を 1m ごとに 5m までの RSSI のデータの計測を行う。IoT デバイスは 1m ごとに 2 秒ごとに BLE ビーコンをスキャンし、RSSI データを 100 回取得する。ESP32 にはケースなしの状態であると BLE の電波強度が高いため、軽減するために厚紙のケースを使用している。



図 5 Raspberry Pi Zero が ESP32 の RSSI を取得する実験の様子

5. 評価と分析

この章では 4.2 の実験で得られた結果の評価と分析を行う。

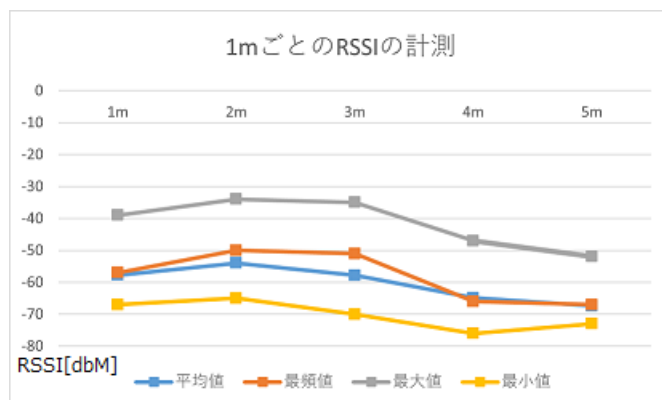


図 6 1m ごとの RSSI のデータの計測

図 6 では Raspberry Pi Zero WH で ESP32 をスキャンし、1m ごとに RSSI データを 100 回取得した平均値と最大値、最小値、最頻値をグラフにしたものである。グラフの X 軸は距離、Y 軸は RSSI を示している。1m から 2m の RSSI データは平均値と最大値、最小値、最頻値すべて上昇している。2m から 4m まではすべてのグラフが減少している。しかし、4m から 5m までは最大値のみ減少しているが、平均値と最頻値、最小値は増加している。

6. 議論

提案するシステムでは 3 点間測位で使用する BLE ビーコンは IoT デバイスデバイスのスキャンで検出できたものを使用するが、IoT デバイスのスキャン時間にも左右され

るため、位置情報の精度にばらつきが出る可能性があるだろう。5のグラフでは理論上IoTデバイスとBLEビーコン間の距離が離れるほどRSSIデータの値は減少する。しかし、結果ではRSSIデータはすべてのデータが比例して減少することはなかった。これは1m地点と5m地点の周囲環境に影響を受けた可能性が高い。4.2の実験環境では床に置いてデバイス間のRSSIデータの計測したため、周囲の環境を受けやすかったため、次回に行う実験ではBLEビーコンを壁に配置して実験するとよいだろう。また、得られた実験結果からBLEビーコンの配置の間隔は2mから5mの間隔で配置すると測位するビーコンが多く採用でき、位置情報の精度改善につながるだろう。

7. おわりに

今回はBLEビーコンを使用した屋内測位で移動するIoTデバイスのローカリゼーションシステムを提案した。デバイスの位置情報は移動したと判定されたときのみユーザーにIoTデバイスがプロットされたマップデータを送信され、ユーザーのIoTデバイスを使用したシステム管理の質の向上を目指した。今回は実験結果をもとにBLEビーコンの配置方法と計測環境を見直し、三点間測位の本格実験につなげたいと思う。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [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] Seco, F., Plagemann, C., Jiménez, A. R. and Burgard, W.: Improving RFID-based indoor positioning accuracy using Gaussian processes, pp. 1–8 (2010).
- [6] 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).
- [7] Kiling, O., Küçüküydiz, 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).
- [8] 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 (FedCIS)*, pp. 1413–1416 (2016).
- [9] 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).
- [10] 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).