

通信可能台数の予測に基づく 動的なBLE通信の終了による省電力化

高橋 祐之介¹ 河竹 純一² 串田 高幸¹

概要: GPS 受信機を用いた位置測位とサーバへの位置情報の送信を行う IoT 機器がある。位置測位と位置情報の送信は消費電力を高くする要因である為、周囲にある通信可能な IoT 機器と通信を行い、その中の 1 台のみが位置測位とサーバへ位置情報の送信を代行することで消費電力を抑える事ができる。そのために IoT 機器は BLE のアドバタイズとスキャンを行う。しかし、通信可能な IoT 機器が何台有るか把握できず、BLE のアドバタイズとスキャンを停止する事ができない。BLE のアドバタイズとスキャンは毎秒 339.7[mW] の電力を消費する為、消費電力が増加し続け、IoT 機器の動作時間が減少する課題がある。この消費電力を削減する為に、すべての IoT 機器の位置情報を予測し、予測位置から通信可能な IoT 機器台数に応じた BLE のアドバタイズとスキャンの停止をする。次の測位タイミングでの IoT 機器の位置情報を予測する為に、IoT 機器に新たに地磁気センサを取り付ける。サーバ上で地磁気センサの値から方角と GPS 受信機から得られた位置と速度を使用し、次の測位タイミングでの位置情報を予想する。すべての IoT 機器の位置情報を予測し、予測位置から通信可能な IoT 機器台数に応じた BLE のアドバタイズとスキャンの停止をする。評価として、BLE のアドバタイズとスキャンを停止しない IoT 機器と、提案方式の BLE のアドバタイズとスキャンを停止する IoT 機器の消費電力を比べる。

1. はじめに

背景

IoT 機器はインターネットを介して通信を行い、人の手を借りずに情報を取得する機器の事である [1]。IoT 機器は直接インターネットに接続し、センサデータをクラウドへ送る役割を担い、センサから収集されたデータをリアルタイムで処理している [2]。Ericsson Mobility Report 2022 によれば、モバイルネットワークを利用した IoT 機器の接続台数は 2021 年に 14.6 億の IoT 機器が存在し、2027 年には 30.2 億台を超えると予測されている [3]。

米国、ロンドン、ドイツでは毎年約 10 万人以上、インドでは毎年 6 万人の子供達が行方不明になっている [4]。子どもたちの見守りを行うために、モバイルネットワークと GPS が搭載された IoT 機器が使用され、子どもが行方不明になった際に過去の位置情報は子供を探す手がかりとなる。そのため、子供の位置情報を記録する事が必要になる [5]。位置情報は緯度と経度である。

多くの IoT 機器はバッテリーで駆動しているため、省電力化はバッテリー動作時間を延ばすために最も重要である [6]。消費電力が増加すると、バッテリー駆動時間が短くなるため、長時間動作するシステムにしなければならない [7]。

子供見守り用の IoT 機器には GPS とモバイルネットワーク (4G・GSM) が使用されている [8]。位置測位中に 20[mA] の電流を使用し、位置情報送信に 240[mA] を使用する [9]。IoT 機器を使用する際の問題は、使用電力の制限である。IoT 機器が連続で位置測位とサーバへのデータ送信を行う場合、消費電力は高くなる [10]。

消費電力を減らす方法として、BLE を用いて周囲の IoT 機器と通信を行い、その中で 1 台の IoT 機器が位置測位とサーバへのデータ送信を代行する方法がある。以下、測位代行という。測位代行の主な動作を図 1 に示す。①BLE のアドバタイズを行い、通信可能な IoT 機器であることを発信する。同時に BLE スキャンを行う。②BLE スキャンによって、周囲に通信可能な IoT 機器が見つかった場合、接続要求を行う。接続後、接続要求の行った機器は IoT 機器の個別識別番号を送信し、代行をお願いする。図 1 では IoT 機器 B が代行をする。③代行をお願いした IoT 機器はスリープに移行する。④代行をする IoT 機器は位置測位を行う。⑤代行をする IoT 機器は代行をお願いした機

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

² 東京工科大学大学院
バイオ・情報メディアコンピュータサイエンス専攻
〒 192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

器の個体識別番号と位置情報をサーバへ送信する。

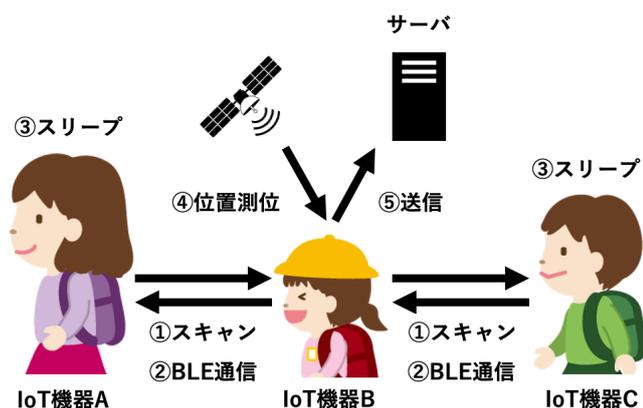


図 1 BLE 通信による測位代行

課題

測位代行は周囲の IoT 機器と BLE 通信を行い、位置測位とサーバへのデータ送信の代行を行う。IoT 機器は周囲の通信可能な IoT 機器と通信を行うため、BLE のアドバタイズとスキャンを行い IoT 機器を探す。しかし、既存手法では通信可能な IoT 機器が周囲に何台あるか把握できず、通信可能な IoT 機器が無くなった場合でも BLE のアドバタイズとスキャンを停止する事ができず、継続的使用による消費電力が増加してしまう課題がある。

BLE のアドバタイズとスキャンの消費電力を計測するために、IoT 機器に ESP32 を使用し、電流計測モジュール INA219 を使用して消費電力を計測した。ESP32 の BLE のアドバタイズとスキャンの設定値を表 1 に示す。消費電力計測では 0.5 秒に電流値を読み込み、2 分間計測を行った。結果を図 2 に示す。

表 1 BLE 設定値

Advertise interval[ms]	Scan window[ms]	Scan interval[ms]
100	11.25	128

図 2 から BLE のアドバタイズとスキャンを行っている間、226.1[mW] から 388.1[mW] の間を推移している。消費電力の平均値を取得した所、339.7[mW] になった。結果から、BLE のアドバタイズとスキャンは 1 秒毎に 339.7[mW] 消費している。通信可能な IoT 機器が無くなった場合でも BLE のアドバタイズとスキャンを停止する事ができず、1 秒毎に 339.7[mW] 消費する課題がある。

各章の概要

第 2 章では関連研究として、IoT 機器と BLE を使用した機器の省電力化について述べる。第 3 章では本稿の課題を解決するための手法について述べる。第 4 章では第 3 章

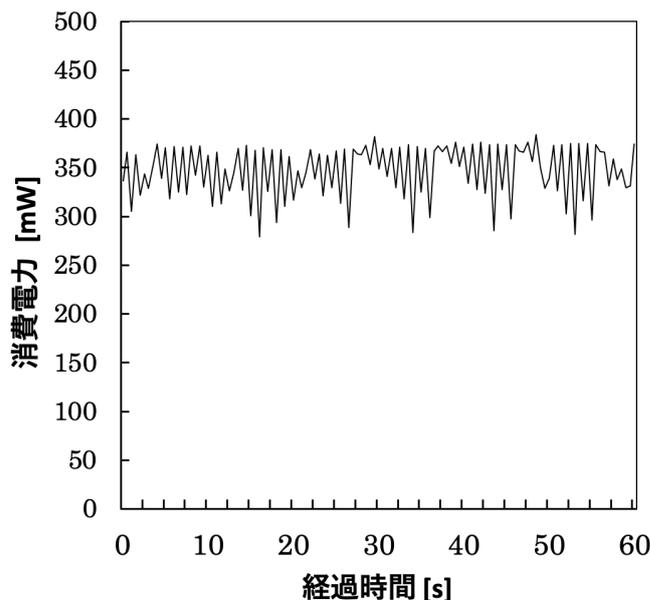


図 2 BLE のアドバタイズとスキャンの消費電力

で提案したシステムの実装方法や、実験環境について述べる。第 5 章では実験の評価方法や分析方法について述べ、第 6 章では提案した手法について議論を述べる。第 7 章では研究と本稿のまとめを行う。

2. 関連研究

Ulrich Bareth らは、位置測位の消費電力を抑える方法として、消費電力の高い GPS の代わりに、Wi-Fi のアクセスポイントを活用した位置測位方法やモバイルネットワークの基地局情報を使用する方法を紹介している。GPS よりも消費電流が少なく、位置測位にかかる時間が少ないため、消費電力を抑える事ができる。しかし、GPS 誤差は 10 m 以内に対して、Wi-Fi の誤差は最大 50 m。モバイルネットワークの誤差は最大 5km と記載されている [11]。Wi-Fi を使用した位置測位に置き換えると、消費電力を削減する事はできるが、大きな誤差により、学校や家に向かっているか、別の場所へ向かっているか判断できなくなる。

Gaoyang Shan らは、BLE 通信の消費電力を抑える方法として、検出時間、アドバタイズ電波送信間隔、スキャン間隔、チャンネル数と発見時間を分析し、設定値を動的に変更する事で通信機器の発見時間を 5 分の 1 以上、短くする方法を提案している [12]。しかし、IoT 機器のような位置測位タイミングで Deep-Sleep モードに移行する機器に分析と動的な変更機能を追加すると、Deep-Sleep モードの時間が短くなる。通信機器の発見時間を削減した以上に分析と動的な変更にかかる場合、消費電力が増加する。

Tim Hadwen らは IoT 機器において、消費電力を少なくするために、モバイルネットワークの代わりに LoRaWAN を使用している。4G 回線を使用した GPS 発信機の送信消費電力は 184[mA] に対して、LoRa は 40[mA] と省電力で

ある。また、LoraWAN の通信範囲は都市部で最大 5 km, 農村部で 20km である [5]。しかし、子供が通信範囲外に移動すると、位置情報を記録できない問題が発生する。

3. 提案方式

周囲に通信可能な IoT 機器が無くなった場合でも BLE のアダプタイズとスキャンを停止する事ができず、増加し続ける消費電力の削減を目的としている。

図 3 に提案のコンセプト図を示す。IoT 機器に地磁気センサを取り付け、サーバ上で地磁気センサの値と GPS 受信機から得られた位置情報と速度情報を使用し、次の測位タイミングの位置情報を予測する。一定の測位間隔で位置測位を行う為、次の測位タイミングは現在の時間に測位間隔を足した時間になる。他の IoT 機器も位置情報の予測を行う。その後、通信可能な IoT 機器の台数を予測する。代行する IoT 機器の数が予測した IoT 機器の台数を上回った場合、BLE のアダプタイズとスキャンを停止させ、位置測位とデータ送信を行う。代行する IoT 機器の数が予測した IoT 機器の台数を上回る事がない場合、21[秒] で BLE のアダプタイズとスキャンを停止させる。この 21[秒] は 1 台の測位代行によって消費電力を削減した消費電力を BLE のアダプタイズとスキャンの電力を超える手前の時間である。これにより通信可能な IoT 機器が無くなった場合でも、BLE のアダプタイズとスキャンを停止する事ができるため、BLE 通信の消費電力を減らす事ができる。また、周囲に通信可能な IoT 機器が無いと予測した場合は BLE のアダプタイズとスキャンを行わない。

IoT 機器は消費電力を少なくするために代行を行われている IoT 機器は Deep-Sleep モードに入る。Deep-Sleep モードの間は、各種センサの値を取得できない。そのため、提案の条件として、人は同じ歩行速度で動くものとする。位置情報の予測と通信可能な IoT 機器の台数の予測はサーバで処理を行い、IoT 機器には予測した通信可能な IoT 機器の台数を送信する。

位置情報の予測

次の測位タイミングの位置での通信可能な IoT 機器の台数を求める必要があるため、次の測位タイミングの位置情報を予測する。予測には地磁気センサの値と GPS 受信機から得られた位置情報と速度情報を使用する。位置測位の誤差の平均は通常 2~3m である [13]。GPS 受信機は NMEA 規格にのデータの出力を行い、現在の位置情報以外に移動速度も出力する事ができる。移動速度は NMEA フォーマットの \$GPRMC で始まるデータセンテンスで取得できる [14]。また、地磁気センサの値取得では田中さんの先行研究により、地磁気センサのキャリブレーションを行う必要がある。キャリブレーション方法は X 軸と Y 軸のそれぞれの最大値と最小値を足して割ることで原点から

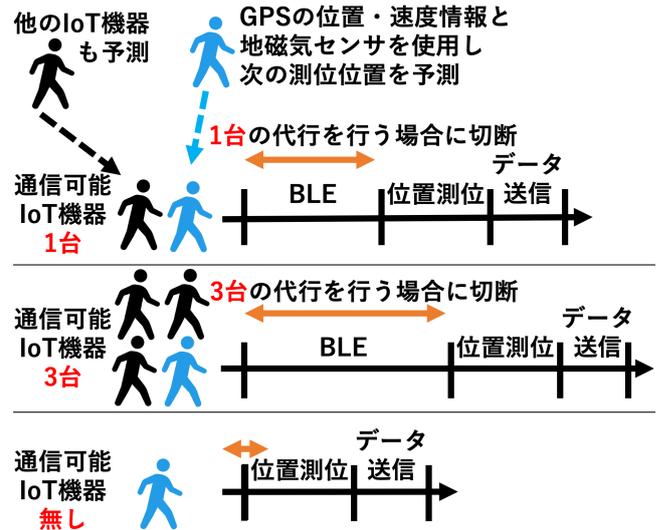


図 3 提案のコンセプト図

の差分の値を求めることができる。その差分の分それぞれの軸の方向に補正することでキャリブレーションができる [15]。キャリブレーションを行う事で、地磁気センサの出力する値から、歩行方向を求める事ができる。

位置情報の予測方法を図 4 に示す。①式 1 を使用して移動距離を求める。式 1 において、Md は移動距離、speed は歩行速度、time は次の位置測位までの時間を示す。②地磁気センサを使用し、歩行している方位を求める。地磁気センサの値を位置測位の間、複数回取得し、最頻値を使用する。③地磁気センサの値から求めた、歩行している方向へ、移動距離分移動させる。④移動させた地点が予想した位置情報になる。

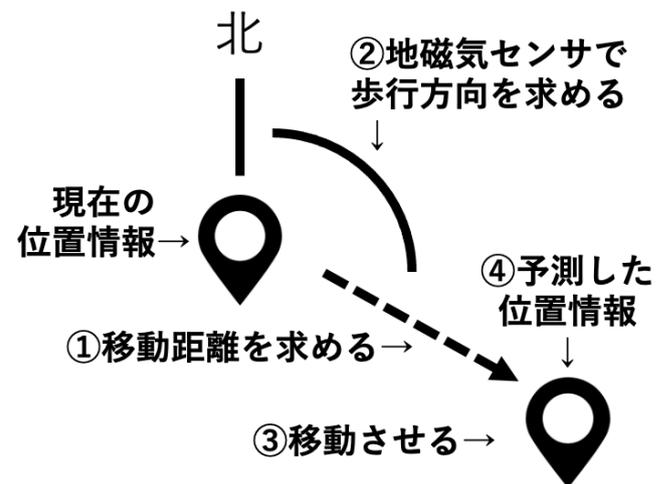


図 4 位置情報の予測方法

$$Md = speed * time \quad (1)$$

通信可能な IoT 機器の台数の予測

通信可能な IoT 機器の台数を調べるため、すべての IoT

機器の測位予測を行い、予測結果を元に算出する。Frankらの実験により、BLEは100mの位置で信号が届く事が確認されている [16]。そのため、自機の半径50m以内にある機器を通信可能なIoT機器とする。通信可能なIoT機器の台数を求める方法を図5に示す。①図4の方法を使用し、他のIoT機器も位置情報の予測を行う。②の通信可能な範囲内にIoTが何台あるか求める。この求めたIoT機器の数が通信可能なIoT機器の予測台数となる。図5の場合、通信可能なIoT機器の予測台数は1台となる。

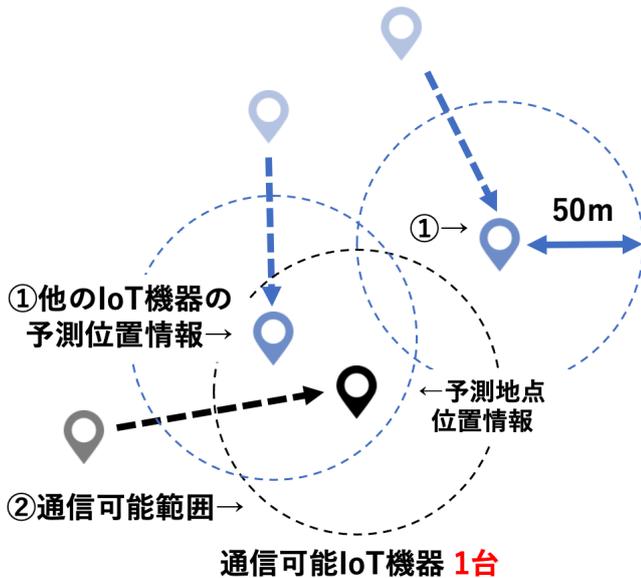


図5 通信可能なIoT機器の台数の予測

BLEのアドバタイズとスキャンの停止

本稿の課題である、通信可能なIoT機器が無くなった場合でもBLEのアドバタイズとスキャンを停止する事ができず、継続的使用による消費電力が増加してしまう課題を解決する。代行するIoT機器の数が通信可能なIoT機器の予測台数を上回った場合、BLEのアドバタイズとスキャンを停止させ、位置測位とデータ送信を行う。例を図6に示す。図6では、通信可能なIoT機器の予測数が2台に対して、代行したIoT機器の数が下回っている0台と1台の時はBLEのアドバタイズとスキャンを行っている。通信可能なIoT機器の予測数に代行したIoT機器の数が達した2台の時、BLEのアドバタイズとスキャンを停止させている。これにより通信可能なIoT機器が無くなった場合でも、BLEのアドバタイズとスキャンを停止する事ができるため、BLE通信の消費電力を減らす事ができる。また、図7のように、通信可能なIoT機器の予測台数が0台の時はBLEのアドバタイズとスキャンは行わずに、位置測位とデータ送信を行う。

通信可能なIoT機器の予測台数2台



図6 BLEのアドバタイズとスキャンの停止

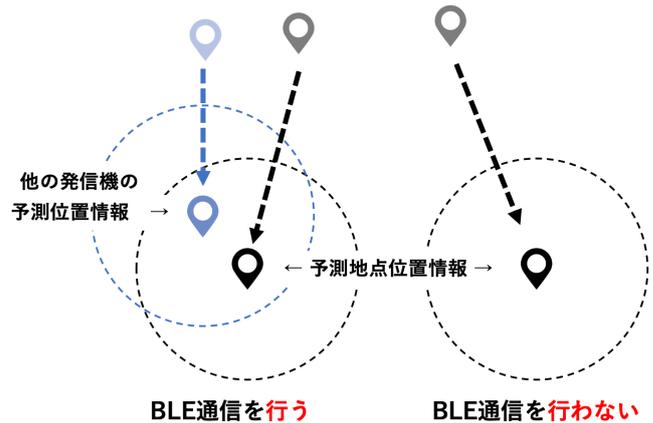


図7 BLEのアドバタイズとスキャンの有無

BLEのアドバタイズとスキャンの終了時間

予測台数のIoT機器と正常に通信できない場合、BLEのアドバタイズとスキャンをし続けてしまう。そのため、BLEのアドバタイズとスキャンを終了するための時間を決めなければならない。測位代行によって消費電力を削減した以上にBLEのアドバタイズとスキャンの電力が増加しては測位代行の効果が無くなる。そのため、測位代行によって削減した電力量を超えないようにBLEのアドバタイズとスキャンの終了時間を決める。測位代行は位置測位とサーバへのデータ送信を削減することができる。サーバへのデータ送信は、IoT機器がネットワークに接続してからサーバにデータを送信し、切断するまでの処理を含む。1台の測位代行で削減した電力量を調べるために、1回の位置測位とデータ通信に使用する電力量を計測する。電力計にはINA216を使用し、900回電力量を計測して、平均値を求める。結果を表2に示す。

表2 1台の測位代行で削減した電力量

位置測位 [mWh]	データ送信 [mWh]	合計 [mWh]
0.749	1.321	2.07

表2から1台の測位代行で削減した電力は2.07[mWh]であった。BLEのアドバタイズとスキャンは1秒毎に339.7[mW]消費しているため、1台の測位代行で削減した2.07[mWh]を超えない秒数を求める。BLE通信時間と消

費電力の関係を図 8 に示す. 赤線は 1 台の測位代行で削減した電力である 2.07[mWh] を示す 図 8 から 21[秒] を超え

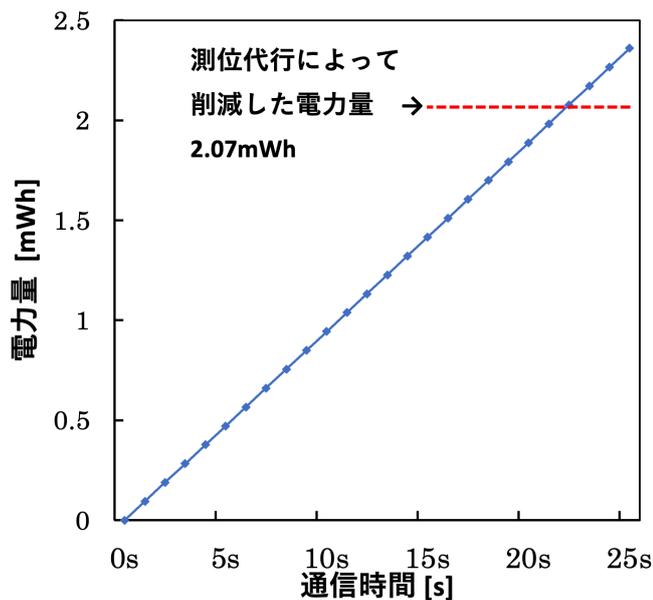


図 8 BLE 通信時間と電力量の推移

ると, 削減した電力量を BLE 通信電力量が上回る. BLE のアドバタイズとスキャンの終了時間を 21[秒] にする. 図 9 のように現在の BLE のアドバタイズとスキャンの終了時間に関係無く, IoT 機器と通信した場合は BLE のアドバタイズとスキャンの終了時間は再度 21 秒になる.

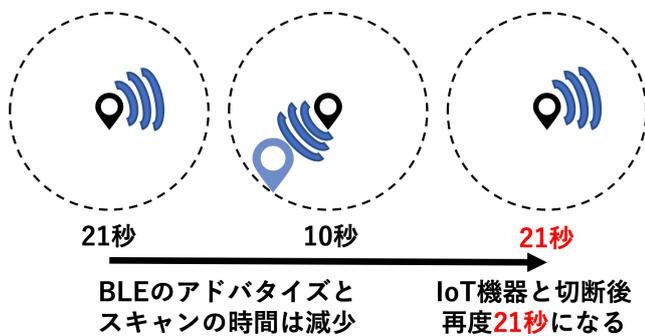


図 9 BLE のアドバタイズとスキャンの時間の延長

ユースケース・シナリオ

ユースケースシナリオでは小学生の集団登下校における, 子供見守り用 IoT 機器を推定している. 学校に来ない, 家に帰ってこないという状況が発生した際に, 親がブラウザから過去の歩行経路を確認する. 小学校では集団登下校を実施しているが, クラブ活動や委員会の参加により, 1 人や少人数で下校する事もある. IoT 機器を衛星と通信できる場所に設置する必要があるため, ランドセルの肩紐に取り付けて使用する. 肩紐に取り付けるため, 小さいバッテリーでより長く IoT 機器を駆動する事のできるシステム

にする必要がある. 本提案により, 消費電力を削減する事ができる為, バッテリーの駆動時間を伸ばす事ができる. バッテリー駆動時間を伸ばす事で, 充電の回数を減らす事ができるようになる.

4. 実装と実験方法

実装

IoT 機器と研究室のサーバ間のメッセージのやり取りは MQTT を使用する. 位置情報の予測と通信可能な IoT 機器の台数の予測は研究室のサーバで求める. Python を使用する.

実験環境

実験で使用する構成を図 10 に示す.

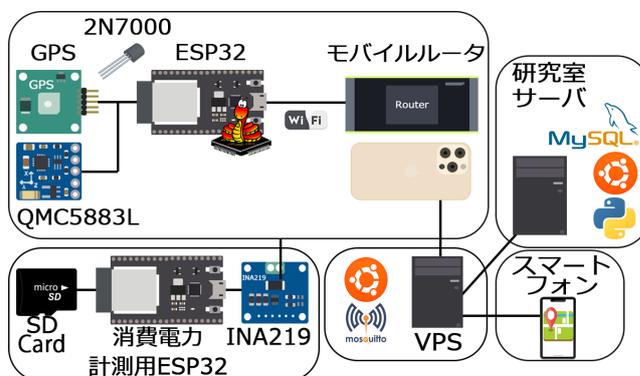


図 10 構成図

ESP32

IoT 機器の制御部として, ESP32 を使用する. ESP32 は Wi-Fi と Bluetooth を内蔵する低消費電力な SoC のマイクロコントローラである. IoT 機器同士の通信では, 内蔵されている Bluetooth を使用する.

GPS 受信機

GPS 受信機は GYSFDMAXB を使用する. 緯度・経度・速度・時刻をシリアル信号で出力する.

地磁気センサ

地磁気センサは QMC5883L を使用する. I2C で ESP32 と通信を行う. 歩行方向を検知するために使用する.

電流計

電流系は INA219 を使用する. 電圧と電力を出力する. 消費電力計測用 ESP32

SD カードに記録するため, ESP32 を使用する. 電流計 INA219 と I2C で接続し, INA219 の測定値を SD カードに書き込む.

モバイルルータ

モバイルルータは iPhone のテザリングまたは HWD36 を使用する. ESP32 とモバイルルータ間は Wi-Fi で

接続する。室外で実験を行うために使用する。

トランジスタ

トランジスタは 2N7000 を使用する。GPS 受信機の電源制御に使用する。

VPS

研究室のサーバと ESP32 間でデータをやり取りする際に VPS を使用する。VPS には MQTT のブローカである mosquitto をインストールする。OS は Ubuntu Server を使用する。

スマートフォン

IoT 機器の場所をブラウザで表示する。

研究室の VPC

位置情報の格納と BLE 通信時間の計算を行う。OS は Ubuntu Server を使用する。Python と MySQLServer のインストールも行う。研究室の VPC から VPS の MQTT ブローカに接続する事で、IoT 機器と通信が可能になる。

5. 評価手法と分析手法

実際に歩行を行い、BLE のアドバタイズとスキャンの時間を固定した IoT 機器と提案方式の IoT 機器の消費電力を比べる。実験中、電流値を取得し、計算によって出力された電流値で比較を行う。実験では大学敷地内を歩行する予定である。東京工科大学八王子キャンパスは 380,821 平方メートルの広さで、建物・道路・横断歩道もあるため、通学路に見立て、複数人で歩行する事ができる。BLE のアドバタイズとスキャンの時間を固定した IoT 機器と提案方式の IoT 機器をリュックに取り付ける。BLE のアドバタイズとスキャンの時間を固定した IoT 機器と提案方式の IoT 機器は互いに通信できないようにする。

歩行のルートを図 11 に示す。東京工科大学の馬の石像がある芝生の周りを歩行する。1 周 500m のコースである。複数人で実験を行い、合流・解散地点を通過する毎に合流を行う。最大人数に達した際、合流・解散地点を通過する毎に解散を行う。

6. 議論

提案手法では、予測した通信可能な IoT 機器の台数の精度は位置情報の予測に大きく左右されると考える。位置情報の予測では地磁気センサの値を位置測位の間、複数回取得し、最頻値を使用している。地磁気センサの値の取得をやめる直前に歩行方向が変わると、変わる前の歩行方向が反映されてしまう可能性が高い。そのため、連続して取得したセンサデータからヒストグラムを作成し、山が 2 つある場合は最後に追加された山を選択する等の地磁気センサのデータの扱い方法を深く考えていく必要がある。

現在、無条件で IoT 機器同士が BLE の通信できれば、測位代行を行う。BLE 通信は見通しが良い場所は通信距

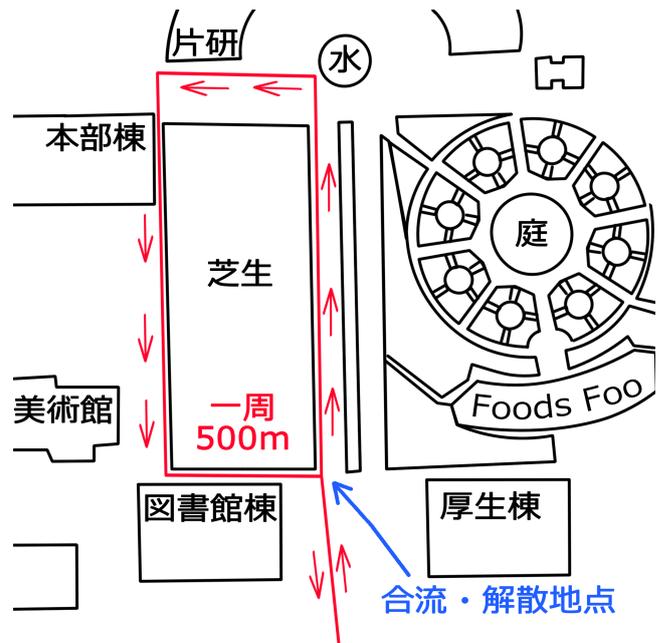


図 11 歩行ルート

離が長くなる。そのため、ブラウザから IoT 機器の位置情報を確認した際に、BLE 通信距離分の誤差が表示されてしまう可能性がある。BLE スキャンを行う際に取得する事のできる、電波強度の指標である RSSI 値をフィルタリングする方法を考えていく必要がある。

7. おわりに

IoT 機器は周囲に通信可能な IoT 機器が何台あるかわからない。そのため、通信可能な IoT 機器が無くなった場合でも BLE のアドバタイズとスキャンによる毎秒 0.097[mWh] の消費電力が増加し、IoT 機器の動作時間が減少する課題があった。提案手法により、通信可能な IoT 機器台数を予測する事ができるようになり、課題が解決できる。今後、評価を行い、提案手法による効果を確認していきたい。

参考文献

- [1] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M.: Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 29, No. 7, pp. 1645–1660 (2013).
- [2] Granat, J., Batalla, J. M., Mavromoustakis, C. X. and Mastorakis, G.: Big Data Analytics for Event Detection in the IoT-Multicriteria Approach, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 7, No. 5, pp. 4418–4430 (2020).
- [3] Cerwall, P.: *Ericsson Mobility Report November 2022* (2022).
- [4] Tahmidul Kabir, A. Z. M., Mamun Mizan, A., Saha, P. K., Kibria, G., Ta-sin, A. J. and Saniat Rahman Zishan, M.: A Comprehensive Smart IoT Tracker for the Children, Elder, and Luggage With the Assistance of Mobile App, pp. 1–5 (2020).
- [5] Hadwen, T., Smallbon, V., Zhang, Q. and D'Souza, M.: Energy efficient LoRa GPS tracker for dementia patients, pp. 771–774 (2017).

- [6] Jaya, M. I., Tong, G. X., Razak, M. F. A., Zabidi, A. and Hisham, S. I.: Geofence Alerts Application With GPS Tracking For Children Monitoring (CTS), pp. 222–226 (2021).
- [7] Raskovic, D. and Giessel, D.: Battery-Aware Embedded GPS Receiver Node, pp. 1–6 (2007).
- [8] Al-Mazloum, A., Omer, E. and Abdullah, M. F. A.: GPS and SMS-Based Child Tracking System Using Smart Phone, pp. 238 – 241 (2013).
- [9] Rajaiyan, A. and Sobati-Moghadam, S.: Optimized Power Consumption Formula for Designing IoT-Based Systems, pp. 74–77 (2022).
- [10] Pang, Y., Ding, H., Liu, J., Fang, Y. and Chen, S.: A UHF RFID-Based System for Children Tracking, pp. 5055–5064 (2018).
- [11] Bareth, U. and Kupper, A.: Energy-Efficient Position Tracking in Proactive Location-Based Services for Smartphone Environments, pp. 516–521 (2011).
- [12] Shan, G. and Roh, B.-H.: Advertisement Interval to Minimize Discovery Time of Whole BLE Advertisers, Vol. 6, pp. 17817–17825 (2018).
- [13] Schutz, Y. and Chambaz, A.: Could a satellite-based navigation system (GPS) be used to assess the physical activity of individuals on earth?, *European Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 51, No. 5, pp. 338–339 (1997).
- [14] Keskin, M. and Say, S. M.: Feasibility of low-cost GPS receivers for ground speed measurement, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 54, No. 1, pp. 36–43 (2006).
- [15] 田中風助, 杉本一彦, 串田高幸: 自律航法に基づく GPS 通信回数の低減による IoT デバイスの省電力な測位の実測結果, CDSL テクニカルレポート (2021).
- [16] Frank, R., Bronzi, W., Castignani, G. and Engel, T.: Bluetooth Low Energy: An alternative technology for VANET applications, pp. 104–107 (2014).