

通信可能台数の予測に基づく 動的なBLE通信の停止による省電力化

高橋 祐之介¹ 河竹 純一² 串田 高幸¹

概要：子供の見守りを行うために、GPS 受信機を用いたサーバへ位置情報の送信を行う IoT 機器がある。消費電力を抑えるため、周囲の IoT 機器と BLE 通信を行い、通信を行なった IoT 機器の中で 1 台が位置測位とサーバへ位置情報の送信を行う（以下、測位代行）。IoT 機器は BLE のアドバタイズとスキャンを行う。しかし、周囲の通信可能な IoT 機器が何台有るか把握できず、通信可能な IoT 機器が無くなったときも BLE 通信を停止することができない。そのため、BLE の電力を消費し続けてしまう課題がある。この課題を解決するために BLE 通信を行う際の位置情報を予測し、通信可能な IoT 機器台数に応じて BLE 通信を停止をする手法を提案する。位置情報の予測では、地磁気センサと GPS 受信機から得られたデータを使用し、歩行可能ルートへマップマッチングを行う。予測中に交差点を通過するときは歩行した頻度が高い経路に沿って、予測を行う。BLE の通信時間が 21[秒] 固定の機器と提案手法の消費電力を比較するために東京工科大学を 6 人で歩行して、合流と解散を行った。提案方式は BLE・GPS・通信で使用する消費電力が BLE の通信時間を 21[秒] 固定の機器と比較して 65%削減できた。

1. はじめに

背景

子供見守り用の位置情報の送信を行う 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 [1]. 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 [2]. 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 [3]. 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 [4]. 消費電力が増加すると、バッテリー駆動時間が短くなる、長時間動作するシステムにするには消費電力を削減しなければならない [5].

文部科学省の調査によると全国の小学校 20,015 校のうち、集団登下校を実施している小学校は 12,632 校である [6]. 消費電力を減らす方法として、Bluetooth Low Energy（以下、BLE）を用いて周囲の IoT 機器と通信を行い、通信を行なった IoT 機器の中で 1 台の IoT 機器が位置測位とサーバへのデータ送信を行う。（以下、測位代行）。BLE は Bluetooth

4.0 仕様に基づいて標準化されている、Bluetooth を省電力にした通信方式である [7].

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 機器の个体識別番号を送信し、代行を要求する。図 1 では IoT 機器 B が代行をする。③代行を要求した 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 機器は代行を要求した機器の个体識別番号と位置情報をサーバへ送信する。

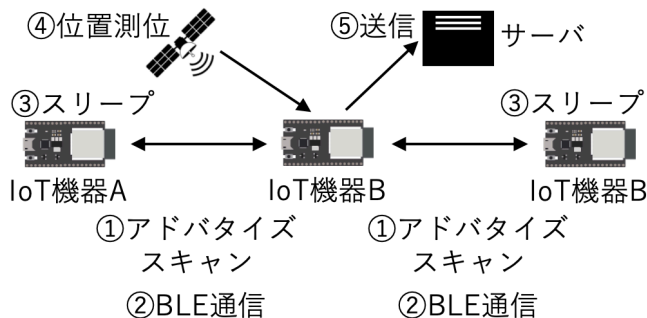


図 1 BLE 通信による測位代行

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

課題

測位代行はIoT 機器同士が BLE 通信を行う必要がある。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、通信可能な IoT 機器が周囲に何台の IoT 機器があるか把握できない。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を停止することができず、BLE の電力を消費し続け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 機器として ESP32 を使用し、電流計測モジュール INA219 を用い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。設定値は MicroPython v1.19 のデフォルト値を使用した。消費電力計測では 0.5[秒] 毎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。

設定項目	時間 [ms]
Advertise interval	100
Scan window	11.25
Scan interval	128

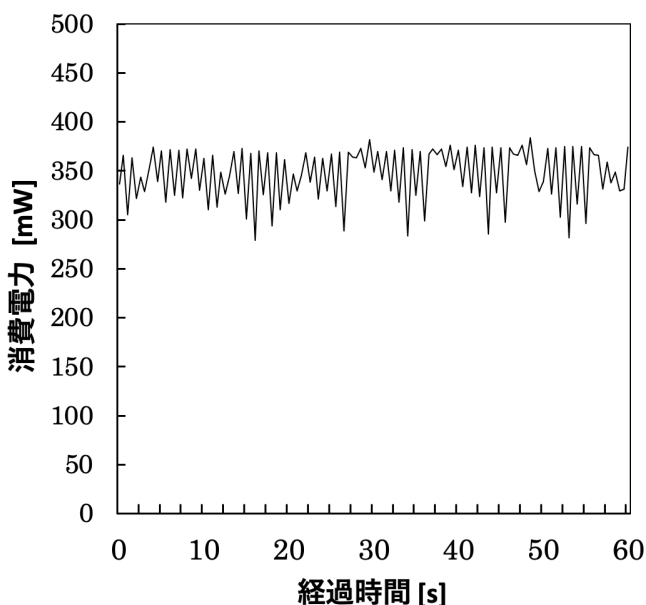


図 2 BLE のアドバタイズとスキャンの消費電力

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ことができず、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、BLE を使用した IoT 機器の省電力化手法、位置情報を扱う IoT 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 章では実験の評価と分析について述べ、第 6 章では提案した手法の議論を述べる。第 7 章では研究と本稿のまとめを行う。

2. 関連研究

Kang Eun Jeon らはバッテリーで動作している BLE アドバタイズを行う機器の省電力化を提案している [8]。BLE のスキャン応答と要求を使用し、BLE スキャンを行う機器の存在を検出する。検知結果によって BLE アドバタイズ間隔を動的に変更する方法である。提案手法では営業時間の決まった屋内店舗での位置情報を提供を行う機器での使用を想定している。そのため、営業時間が定められている場合のように高頻度で BLE スキャン機器の有無が変わらない状況で有効であり、BLE アドバタイズの消費電力を削減することができる。しかし、位置情報を発信する IoT 機器は周囲の IoT 機器の有無が短時間で変わる。そのため、BLE スキャン時の検知に遅延が発生する可能性がある。

Zhuoling Xiao らは位置測位を省電力にするため、マルコフランダムフィールドモデルを活用した、新しいマップマッチングの方法を提案している [9]。この提案は処理が早く、リアルタイムで位置情報を確認することができる。また、アルゴリズムが軽量なため、省電力である。しかし、地磁気センサ、加速度センサの値を連続的に取得し、新しいアルゴリズムによって位置の修正を行うため、センサからデータを取得している間は CPU をスリープモードにすることができない。スリープに移行できない分の消費電力が増加してしまう可能性がある。

Hongwei Du らは GPS のデータ以外に Wi-Fi のデータを複合させて、クラウドサーバ上で位置情報を確定する方法を提案している [10]。活用することで、省電力かつ精度の高い位置情報を得ることができる。位置測位を行う処理の一部をサーバ上で処理を行うため、バッテリーで動作する IoT 機器に最適である。しかし、大容量バッテリーや高性能 CPU を搭載したスマートフォンでの動作を想定し、評価を行っている、小型バッテリーで動作する IoT 機器では適さない可能性がある。

先行研究として、地磁気センサと GPS の位置情報・速度情報を用いて、直線距離で BLE 通信時の位置情報と通信可能な IoT 機器の台数を予想する方法がある [11]。この方法は等速直線運動をする必要があるため、通学路にカーブや右左折がある場合に通信可能な IoT 機器の台数に大きく誤差が発生してしまう。

3. 提案

本研究では、周囲に通信可能なIoT機器がない場合でもBLEのアダプタイズとスキャンを停止することができず、電力を消費し続けてしまう課題に対し消費電力を削減することを目的としている。

提案のコンセプトを図3と図4に示す。図3では周囲に通信可能なIoT機器がある場合にのみBLE通信を行う。本提案では、通信可能なIoT機器の予測制度を高めるために衛星写真から歩行可能な道の情報（以下、歩行可能ルート）を作成し、マップマッチングを行う。位置情報の予測時は歩行可能ルートに沿ってBLE通信を行う際の位置情報を予測する。歩行可能ルート上に交差点がある場合は過去の交差点の通過経路を使用し、頻度が高い歩行した経路に沿って、予測を行う。BLE通信時の位置情報の予測はサーバ上で行う。サーバで管理している他のIoT機器の位置情報も予測し、通信可能なIoT機器が周囲に無い場合は、BLEアダプタイズとスキャンを行わない。

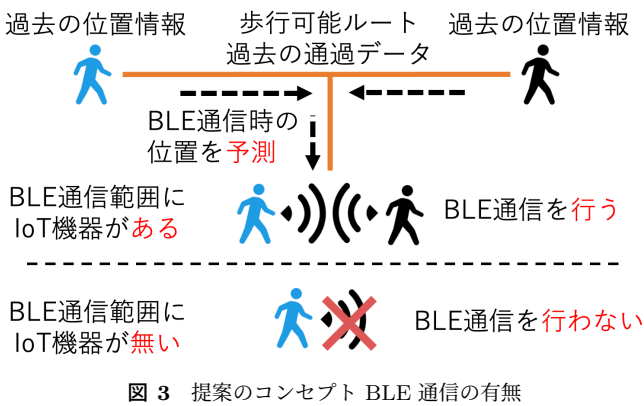


図3 提案のコンセプト BLE通信の有無

図4では代行するIoT機器の数が通信可能な機器の予測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。これにより通信可能なIoT機器が無くなった場合に、BLEのアダプタイズとスキャンを停止することができる。

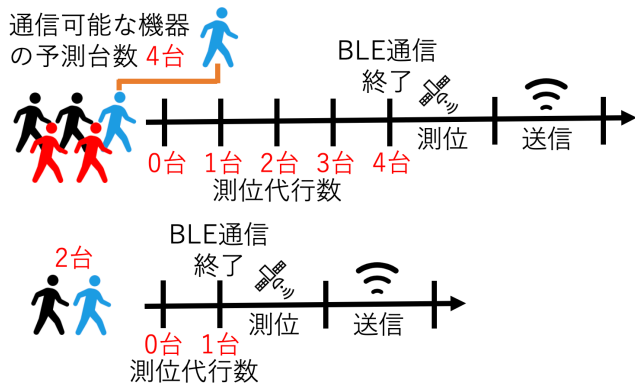


図4 提案のコンセプト BLE通信の終了

BLEは見通しが良い場合、2つのIoT機器間の距離が100[m]を超えて通信が行える[12]。しかし、IoT機器間で安定した通信ができる距離は50[m]以内とされている[13]。通信が不安定な機器を通信可能な機器の予測台数に含むことで、IoT機器は通信ができるまでBLE通信を続け、消費電力が増加する。安定した通信を行うために、電波強度を示すReceived signal strength indication(以下、RSSI値)を使用し、BLEのスキャン結果をフィルタリングをする。

歩行可能ルートの読み込み・交差点の通過情報の保持

初めに衛星写真から歩行可能ルートを作成する。歩行可能ルートを結び、交差点・曲がり角・行き止まりに番号（以下、地図ID）をつける。地図IDにはその地点の緯度、経度と隣接する地図IDを結びつけて、これを地図情報とする。隣接する地図IDは必ず1つ以上の地図IDが格納される。隣接地図IDが1つの場合は行き止まり、2つの場合は曲がり角、3つ以上の場合には交差点と判断する。

筆者が東京工科大学の衛星写真から作成した地図IDと歩行可能ルートを図5に示す。図5において、数字は割り振られた地図IDを示す。表2は図4と対応している地図ID(1~4)の地図情報である。

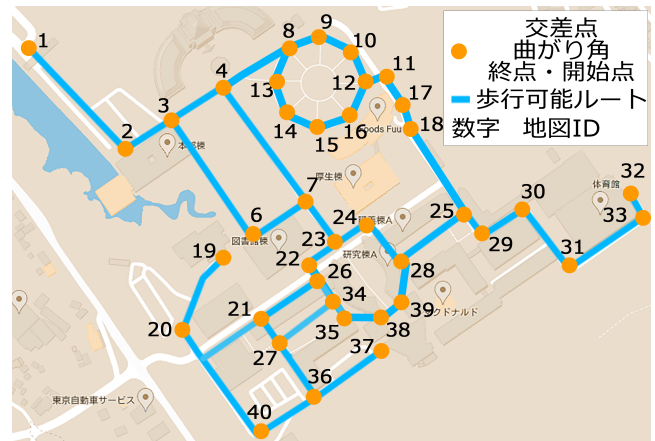


図5 東京工科大学の地図IDと歩行可能ルート

表2 1~4の地図情報

地図ID	緯度	経度	隣接地図ID
1	35.62775	139.33785	2
2	35.62656	139.33911	1,3
3	35.6268	139.33959	2,4,6
4	35.62726	139.34047	3,8,7

GPS受信機から出力された緯度・経度の情報と、歩行可能ルートを使用し、マップマッチングを行う。マップマッチングを行う際にみちびき(準天頂衛星システム)に対応したGPS受信機を使用する。みちびき(準天頂衛星システム)に対応したGPS受信機の誤差は4[m]以内とされている[14]。小林らはGPS受信機の誤差を確かめる実験を

しており、3[m] の誤差であった [15]。GPS による測位精度は水平誤差 13 [m] 以下とされており、測位の需要を満たされていると判断できる [16]。よって、マップマッチングはみちびき（準天頂衛星システム）に対応した GPS 受信機で測位した位置情報と、歩行可能ルートを使用して行う。マップマッチングの手法を図 6 に示す。①初めに、GPS の位置情報と歩行可能ルート上の最近傍点を求める。②次に、すべての最近傍点との距離を計算する。③複数の最近傍点の中から GPS の位置情報との距離が一番短い最近傍点がマップマッチング後の座標となる。

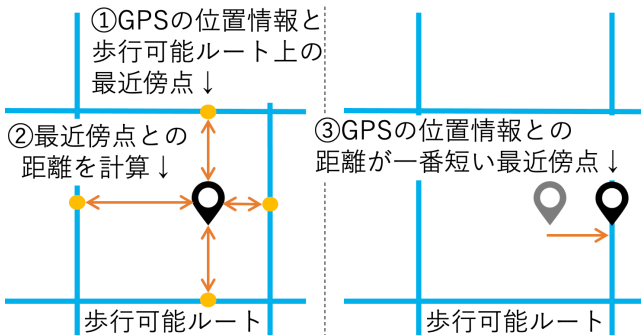


図 6 マップマッチング手法

IoT 機器が交差点（地図情報の隣接地図 ID が 3 つ以上）を通過した際の経路を交差点の通過情報に記録する。交差点の通過情報は以下の内容を含む。

機器 ID

サーバで管理している IoT 機器に割り当てられた一意の番号を格納

地図 ID

通過した交差点の地図 ID を格納

通過前地図 ID

交差点を通過する前に向かってきた交差点・曲がり角・行き止まりの地図 ID を格納

通過後地図 ID

交差点を通過した後に向かった交差点・曲がり角・行き止まりの地図 ID を格納

通過回数

交差点を通過した際の経路が初めての場合は 1 を格納し、同じ経路で交差点を通過した場合にカウントアップする。

交差点を通過する判断は GPS から取得する。GPS で測位した最新の位置情報と 1 つ前の位置情報を使用する。交差点を通過する判断を図 7 に示す。①初めに GPS で測位した最新の位置情報を歩行可能ルートにマップマッチングする。②次に GPS で測位した 1 つ前の位置情報を歩行可能ルートにマップマッチングする。③マップマッチング後、歩行可能ルート上で 2 点間の距離が最短になるルートを選択する。④選択したルート内の交差点の有無で判断を

行い、ルート内に交差点（隣接地図 ID が 3 つ以上）が含まれている場合に交差点を通過したことになる。このとき、交差点の通過情報の追加または通過回数の更新を行う。

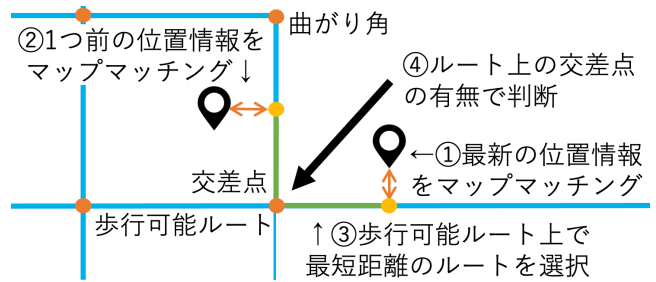


図 7 交差点を通過する判断

交差点の通過情報の使用と位置情報の予測

初めに GPS で測位した位置情報を歩行可能ルートにマップマッチングする。その後、地磁気センサから得られた歩行方向から地図 ID を決める。地磁気センサから抽出された角度情報は時間経過による誤差の蓄積が無い [17]。マップマッチング後、地磁気センサの歩行方向から向かっている地図 ID を決める手法を図 8 に示す。①初めに地磁気センサから歩行している方向を求める。求めた方向にマップマッチング後の位置情報を移動させる。②歩行可能ルートを結ぶ 2 点の交差点・曲がり角・行き止まりの距離を移動前と移動後、それぞれ計算する。③移動後、2 点の中で距離が短くなる方向へ向かっていると判断する。図 8 では、④の矢印が指す方向の交差点へ向かっていると判断する。

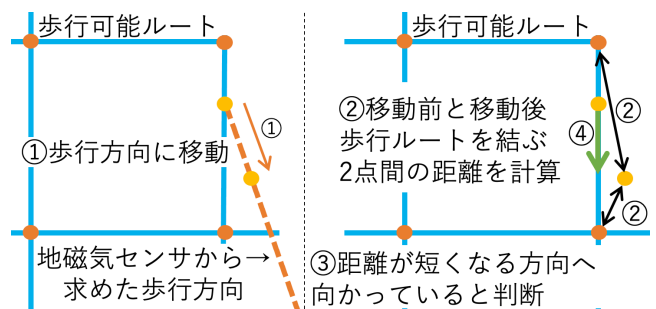


図 8 向かっている交差点・曲がり角を決める手法

位置情報の予測には歩行可能ルートと、交差点の通過情報を使用する。予測時に交差点を通過しない場合の予測手法を図 9 に示す。①初めに GPS で測位した最新の位置情報を歩行可能ルートにマップマッチングする。②図 8 の手法を使用し、移動方向を決める。③式 (1) を使用して移動の距離を求める。式 (1) において、 Md は移動の距離、 $speed$ は歩行速度、 $time$ は次の BLE 通信までの時間を示す。④歩行可能ルートに沿って、位置情報を移動の距離だけ移動させる。この移動した点が次の BLE 通信を行う際の予測位置になる。

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

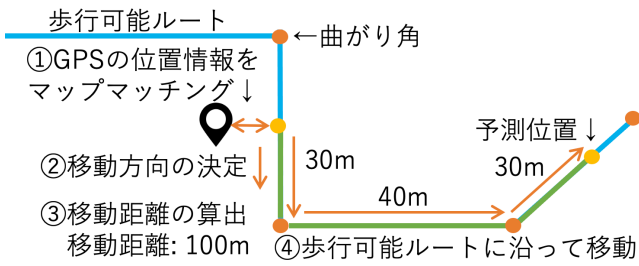


図 9 交差点を通過しない場合の予測手法

図 10 は仮に 100[m] 移動行う場合、交差点を通過することになる。予測時に交差点を通過する場合は、交差点の通過情報によって位置情報の予測を行うか、BLE 通信をせずに、GPS 測位を行うか切り替える。交差点の通過情報から位置情報予測を行う IoT 機器の機器 ID と、通過する地図 ID に対応するデータを使用する。図 11 のように交差点を一度も通過したことがない場合は、位置予測と BLE のアダプタイズとスキャンを行わず、GPS 測位を単独で行う。図 12 のように交差点を通過したことがあるが、通過回数の最大値に重複がある場合も位置予測と BLE のアダプタイズとスキャンを行わず、GPS 測位を単独で行う。図 13 のように通過回数の最大値に重複が無い場合は通過回数の多い方へ位置予測を行う。経路を選択する際、登校時と下校時の経路が相互に利用できるように、通過前 ID と通過後 ID を交換して経路選択も行う。交換した経路を使用して交差点を通過する場合、通過前 ID と通過後 ID を再度交換して、通過回数の更新を行う。その後、図 9 と同じように決定した経路と歩行可能ルートに沿って、移動の距離分、位置情報を移動させる。この移動した点が次の BLE 通信を行う際の予測位置になる。

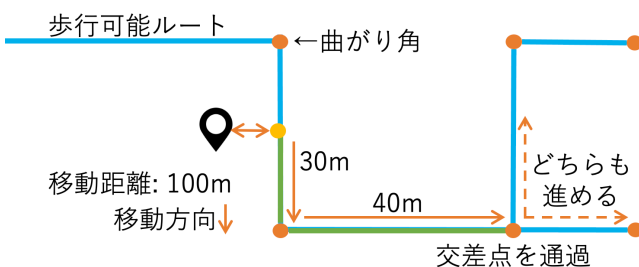


図 10 予測時に交差点を通過する

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、BLE 通信を行う際の位置情報を予測する。予測結果を元に通信可能な IoT 機器の台数を予測する。Frank らの実験により、BLE は 100[m] の位置で

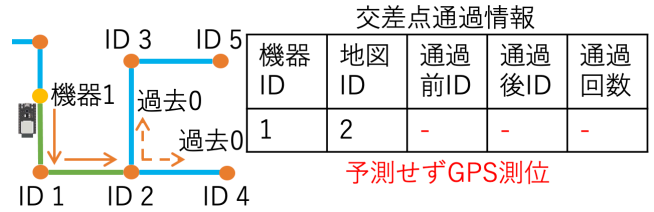


図 11 初めて通る交差点

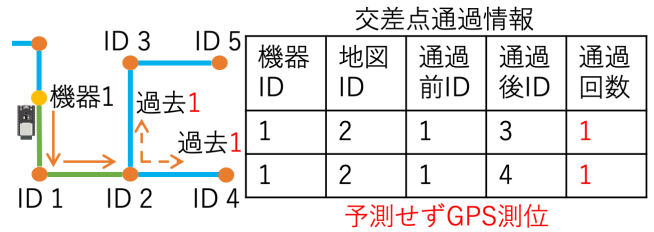


図 12 通過回数の最大値に重複がある

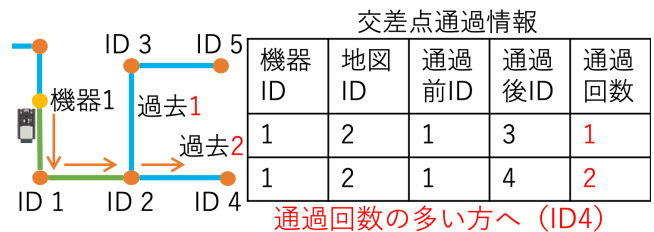


図 13 通過回数の最大値に重複がない

信号が届くことが確認されている [18]. そのため、自機の半径 100[m] 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 機器の台数を予想する手法を図 14 に示す。①サーバで管理しているすべての IoT 機器の BLE 通信を行う際の位置情報を図 8～図 13 の手法を使用して予測する。②BLE の通信可能範囲内に他の IoT 機器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 14 の場合、通信可能な IoT 機器の予測台数は 1 台となる。

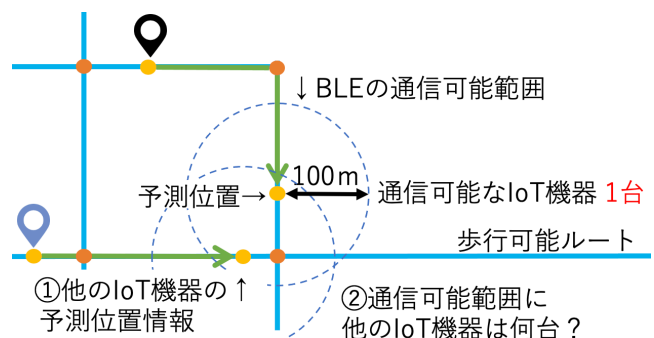


図 14 通信可能台数予測手法

BLE のアダプ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 のアダプタイズとスキャンを停止することが

できず、継続的な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 15 に示す。図 15 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 台のときは 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 台のとき、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ことができるため、BLE 通信の消費電力を減らすことができる。図 16 のように、通信可能な IoT 機器の予測台数が 0 台のときは BLE のアドバタイズとスキャンは行わずに、GPS を使用した位置測位とデータ送信を行う。

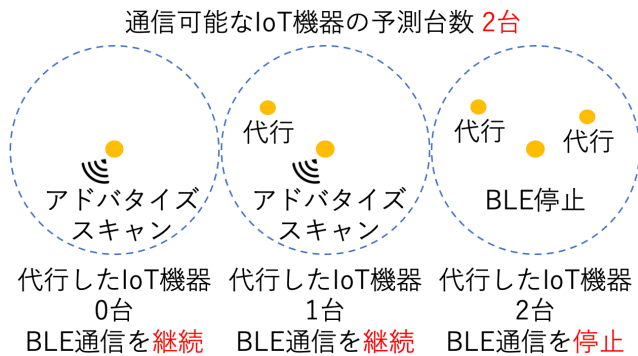


図 15 BLE のアドバタイズとスキャンの停止

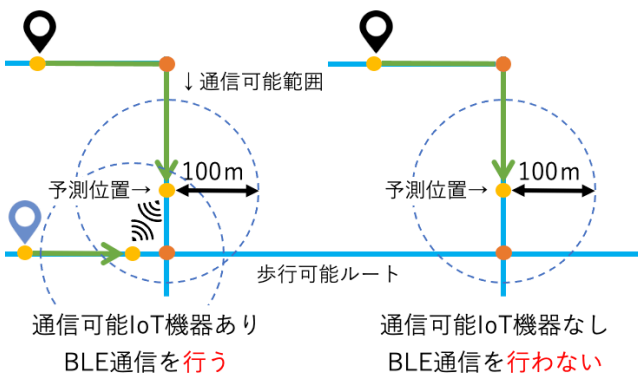


図 16 BLE のアドバタイズとスキャンの有無

BLE のアドバタイズとスキャンの停止時間

急な速度の変化や、歩行中に停止や旋回を行うことで通信可能な IoT 機器の予測台数に誤差が発生した場合、BLE 通信を停止することができない。そのため、BLE のアドバタイズとスキャンを停止するための時間を決める。測位代行によって削減した消費電力以上に 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必要性が無くな

る。そのため、測位代行によって削減した電力量を BLE の消費電力が超えないように BLE のアドバタイズとスキャンの停止時間を決める。IoT 機器として ESP32 を使用した実験では 21[秒] を超えると、削減した電力量を BLE 通信電力量が上回っている [11]。そのため、BLE のアドバタイズとスキャンの停止時間を 21[秒] にする。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らない場合、21[秒] で BLE 通信を停止する。

RSSI 値を使用したフィルタリングと通信範囲の制限

BLE は見通しの良い場所では 2 つの IoT 機器間の距離が 100[m] を超えて通信が行える [12]。しかし、IoT 機器間で安定した通信ができる距離は 50[m] 以内とされている [13]。通信が不安定の場合、通信可能な IoT 機器と予測したが、通信できない状態が発生する。このとき、タイムアウト時間まで BLE 通信を行い、BLE の消費電力が増加してしまう。本稿では電波強度である RSSI 値を使用して、BLE のスキャン結果をフィルタリングし、安定した通信ができる 50[m] 以内の機器にのみ接続要求をする。

提案手法の確立のため、IoT 機器として ESP32 を使用し、0[m]~100[m] の RSSI 値を 5[m] 毎に取得した。この実験では BLE のアドバタイズデータに“BLE”と言う文字を格納し、アドバタイズを行う。もう一台の ESP32 はスキャンを行い、アドバタイズデータに“BLE”と言う文字が入っていた場合は設置した距離と RSSI 値を記録する。実験場所は東京工科大学の図書館棟と厚生棟の中間地点から片柳研究所を向かう途中の道で行う。実験結果を図 17 に示す。図 17 から初めは電波強度が急激に弱くなり、距離が長くなるにつれて、電波強度の変化が緩やかになることがわかる。各距離の最大電波強度の 45[m]~55[m] は-78[dBm] と変化が無く、45[m]~55[m] の間は RSSI 値を使用したフィルタリングができない。安定した通信が可能な 50[m] 以下の IoT 機器のみ接続可能で、フィルタリング可能な最大距離、半径 40[m] 未満の IoT 機器を通信可能な機器と予測する。IoT 機器は 45[m] の最大電波強度である-77[dBm] 以下の IoT 機器に接続要求を行う。

RSSI 値でフィルタリングを行った場合、安定した通信によって、BLE 通信の時間は減るが、測位代行を行う回数が減り、GPS の使用回数が増えることもある。評価では、RSSI 値のフィルタリングの有無による消費電力への影響についても比較を行う。

ユースケース・シナリオ

図 18 にユースケースシナリオを表す。ユースケース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

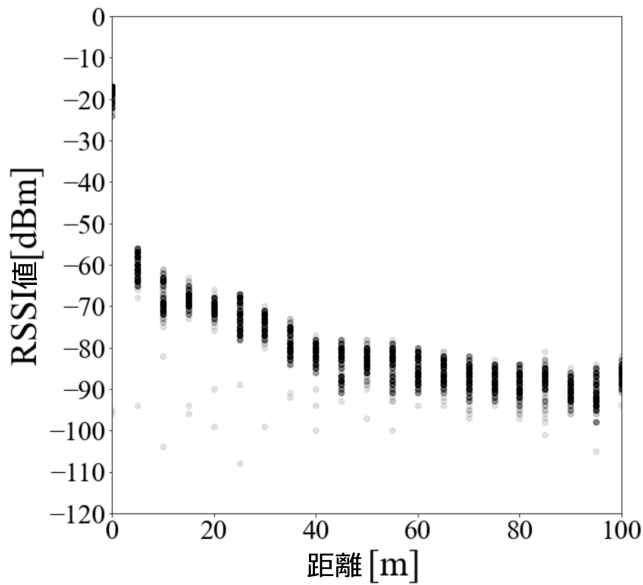


図 17 電波強度の分布

活動や委員会の参加により、1人或少人数で下校することもある。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 機器を駆動すること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ことができるため、バッテリーの駆動時間を伸ばすことができる。バッテリー駆動時間を伸ばすことで、充電の回数を減らすことができるようになる。

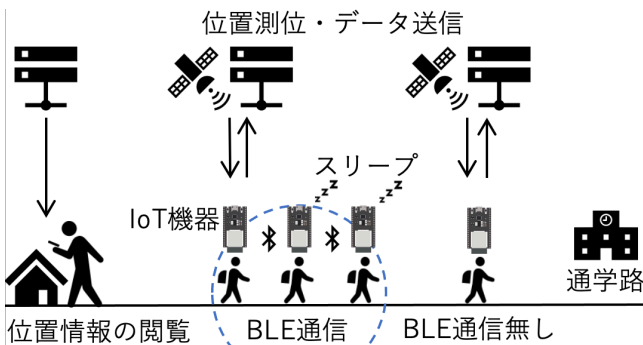


図 18 ユースケース

4. 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行う。IoT 機器には通信可能な IoT 機器の予測台数のみ返却を行う。IoT 機器では Micro Python を使用し、研究室のサーバでは Python を使用する。構成を図 19 へ示す。

ESP32

IoT 機器として、ESP32 を使用する。ESP32 は Wi-Fi

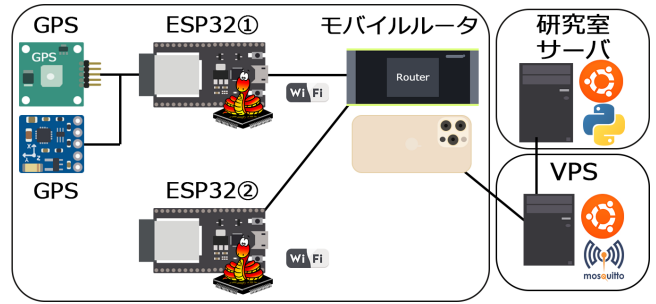


図 19 構成図

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、ESP32 に搭載されている 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。

モバイルルータ

モバイルルータとしてスマートフォン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。

VPS

研究室のサーバと ESP32 間でデータをやり取りする際に、データの中継機として 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。

研究室の VPC

各 IoT 機器の通信可能な機器の予測台数を求める。OS は Ubuntu Server を使用する。Python が使用できる環境である。

実験での処理の流れを図 20 へ示す。①測位タイミングでサーバ上にあるセンサデータのバッファをクリアする。②IoT 機器はサーバから通信可能な機器の予測台数取得する。③IoT 機器同士で BLE 通信を行う。BLE 通信の流れは図 21 に示す。④位置測位を行う機器は GPS 受信機から位置情報と速度情報、地磁気センサから歩行の方位を取得する。測位代行された機器はこの処理を行わない。⑤IoT 機器はセンサから取得したデータを VPS を通じて研究室のサーバに送信する。⑥サーバは提案手法を使用し、次の BLE 通信を行う際の位置情報を予測する。⑦予測された IoT 機器の位置情報から、すべての IoT 機器の通信可能台数を予測し、予測結果バッファに格納する。

BLE 通信の流れを図 21 に示す。測位代行を行うため、Generic Access Profile (GAP)/Generic attribute profile (GATT) 接続に基づき、ESP32 同士が接続を行う [19]。

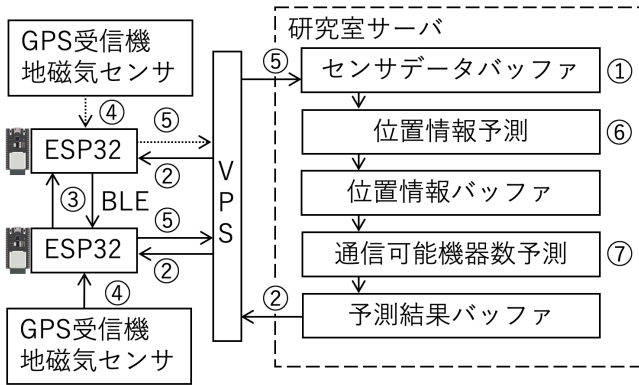


図 20 処理の流れ

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。BLE のアドバタイズを行う際、データ部にプログラム開始時からの累計測位回数を入れる。同時に BLE スキャンを行う。②消費電力の均等化と接続要求の衝突を防ぐため、BLE スキャンによって、自機よりも累計測位回数の多い機器が見つかった場合、接続要求を行う。RSSI 値でフィルタリングを行う場合は、スキャン時の RSSI 値が指定された RSSI 値を下回る場合は接続要求を行わない。③BLE 接続後、GATT 通信を行う。測位代行を行う機器がペリフェラルになり、測位代行を任せる機器はセントラルになる。接続後、測位代行を行う機器は、今まで測位代行を行った機器の ID と測位代行を任せる機器の ID を取得する。その後、切断通知を行い、GATT 通信を終了する。測位代行を行う機器は再度 BLE のアドバタイズとスキャンを行う。測位代行を任せた機器はスリープモードに入る。

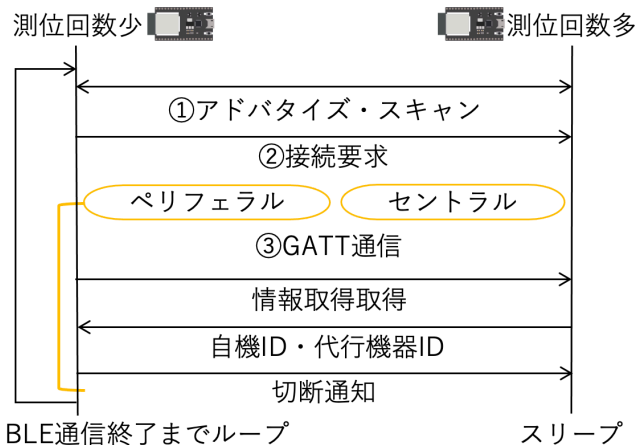


図 21 Bluetooth 通信手順

地磁気センサは QMC5883L を使用する際、周辺磁場の影響によりベクトルが移動しているため、キャリブレーションが必要になる [20]。以下の方法で地磁気センサのキャリブレーションを行う。

- (1) 地磁気センサを 8 の字で回転させる
- (2) 回転中に M_x と M_y の最大値・最小値を取得する

(3) M_x と M_y の中間値をそれぞれ (最大値+最小値) / 2 で求める

(4) この中間値を M_x と M_y から引き算する

地磁気センサ QMC5883L を回転させたときの X 軸と Y 軸の散布図とキャリブレーション後の散布図を図 22 に示す。図 22 の青は地磁気センサを 8 の字で回転させたときの散布図になる。赤はキャリブレーション後の散布図である。中心座標が原点に近づき補正がされていることがわかる。その後、地磁気センサから式 (2) を使用して、北を 0 度と

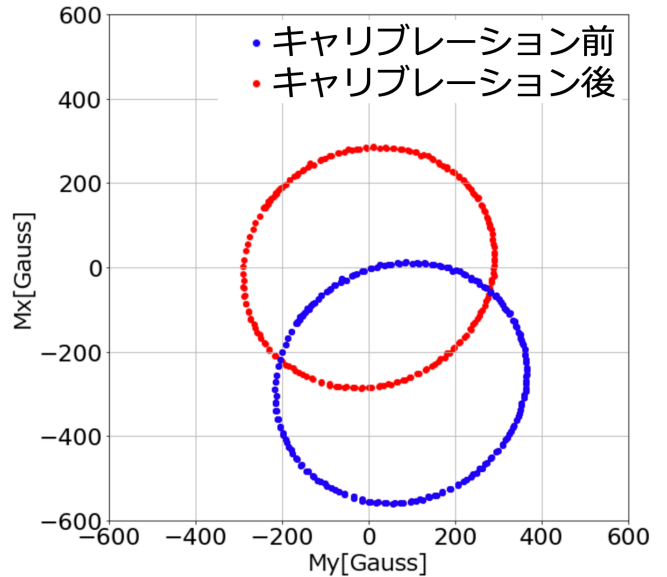


図 22 地磁気センサデータの散布図

した歩行方向を求める [21]。式 (2) において、 $angle$ は北を基準とした角度、 M_x は地磁気センサの x 成分、 M_y は地磁気センサの y 成分を示す。

$$angle = \arctan(-M_y/M_x) \quad (2)$$

5. 実験と分析

BLE の通信時間が 21[秒] 固定の機器、測位代行を行い RSSI 値でフィルタリングを行わない機器、測位代行を行い RSSI 値でフィルタリングを行う機器の評価を行う。通信・GPS・BLE に使用した消費電力と、タイムアウト時間まで BLE 通信を行ったときの原因を評価・分析する。BLE の通信時間を固定した機器の 21[秒] は測位代行 1 台によって削減した電力量を BLE の消費電力が超えないように設定した時間である [11]。

実験では東京工科大学内を歩行する。岡さちらは島根県松江市の小学生 670 人を対象に調査した所、集団登下校は 6 人~10 人のグループ構成されていた [22]。6 人の集団登下校行われることがあるため、今回の実験では 6 人で歩行を行う。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、複数人で歩行することができる。

実験環境

1人2つのESP32を持たせて計12個のESP32を使用する。実験ではGPSと地磁気センサを4つ用意し、図23のように取り付けていない機器とセンサデータを共有して使用する。グループ内の人にはセンサが片方の人にしかセンサを取り付けていないため、常に2人で行動を行う。センサが取り付けられたESP32は毎回GPSと地磁気センサのデータを取得し、センサデータの取得に掛かった時間をESP32の内部に記録する。各ESP32にはGPS・地磁気センサから得られたデータを使用した時間とBLEの通信時間、サーバとの通信回数の記録を行う。図23のAから始まるESP32にはRSSI値でフィルタリングを行うプログラムを実行し、Bから始まるESP32にはRSSI値でフィルタリングを行わないプログラムを実行する。プログラムでAとBは互いに通信できないようにしてある。今回使用する

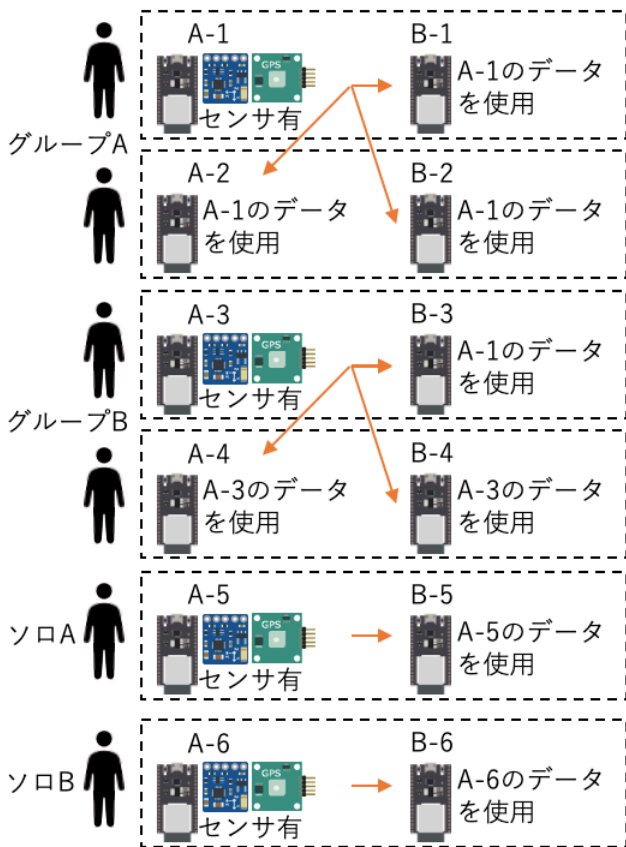


図 23 センサデータの共有

GPS モジュール AE-GYSFDMAXB のデータシートを見ると、電源を入れてから位置情報を取得するまでに Warm start の場合は 34[秒] 必要である。そのため、BLE 通信のタイムアウト時間である 21[秒] を足すと、1 回の測位処理に 55[秒] 必要になる。残りの 5[秒] をデータ送受信の時間

で使用し、実験では 1 分間隔で測位処理を行う。

大学内で実験を行う際の歩行ルートを図 24 に、プログラム上に登録した実験で使用する歩行データを可視化したものを図 25 に示す。登校実験では図 24 の緑で示した場所から歩行を開始し、水色で示した場所で合流を行い、学校へ歩行する。合流地点に先に到着した場合は、合流できるまで歩行をやめ、待機する。下校実験では図 24 の学校から歩行を開始し、水色の場所で解散する。解散後、登校実験で歩行を開始した場所へ向かい、到着後、歩行をやめ待機する。

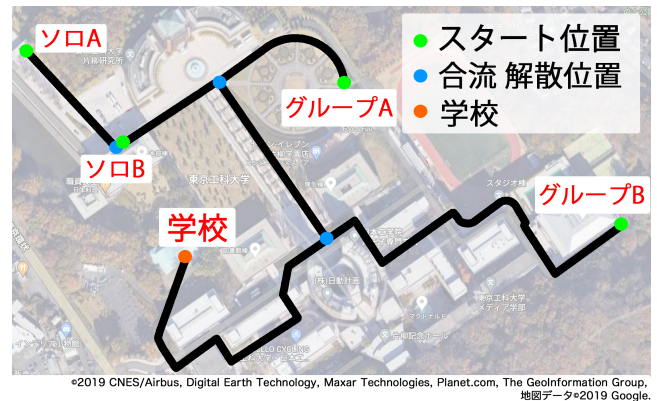


図 24 実験での歩行ルート



図 25 実験で使用する歩行可能マップ

GPS・BLE・通信の消費電力

各 ESP32 に記録された、GPS・地磁気センサから得られたデータを使用した時間、サーバへの通信回数とセンサが取り付けられた ESP32 に記録された、センサデータを取得するまでの時間を使用し、測位処理で使用した消費電力を求める。計算に使用する数値を表 3 に示す。BLE の消費電力は課題で挙げた図 2 の値を使用する。IoT 機器として ESP32 を使用し、サーバとの送受信にかかる電力を測定した実験では、サーバとの送受信にかかる消費電力は 1.321[mWh/1 回] であった [11]。GPS の消費電力は電流計測モジュール INA219 を用いて新たに消費電力を計測した。

GPS の消費電力計測では BLE の消費電力を計測したときと同じく 0.5[秒] に電流値を読み込み、2 分間計測後、平均を求めた。消費電力を求める際はこれらの値を使用する。

表 3 消費電力を求める際に使用する消費電力

項目	消費電力
BLE	339.7[mW/s]
GPS	347.0[mW/s]
通信	1.321[mWh/1 回]

実験結果と分析

GPS・BLE・通信の消費電力

BLE の通信時間が 21[秒] 固定の機器、測位代行を行い RSSI 値でフィルタリングを行わない機器、RSSI 値でフィルタリングを行う機器の GPS・BLE・通信に使用する消費電力を比較する。図 26 と図 27 はそれぞれの GPS・BLE・通信に使用した消費電力を表している。図 26 の縦軸は 6 台分の積算電力量を表し、横軸は実験時間を表す。1 つのグラフの中で登校実験と下校実験を 3 回づつ行っている。図 27 では 3 回行った登校実験と下校実験のそれぞれの積算電力量を表している。図 26 から、BLE の通信時間が 21[秒] 固定の場合、6 台の ESP32 が 1147.7[mWh] 消費しているのに対し、測位代行を行い RSSI 値でフィルタリングを行わない機器は 401.6[mWh]、RSSI 値でフィルタリングを行う機器は 425.2[mWh] となった。BLE の通信時間が 21[秒] 固定の IoT 機器より、提案手法では 65% の消費電力を削減できた。図 27 を見ると、計 6 回の実験で RSSI 値でフィルタリングを行わない機器が 4 回フィルタリングを行う機器の積算電力量を下回っていた。

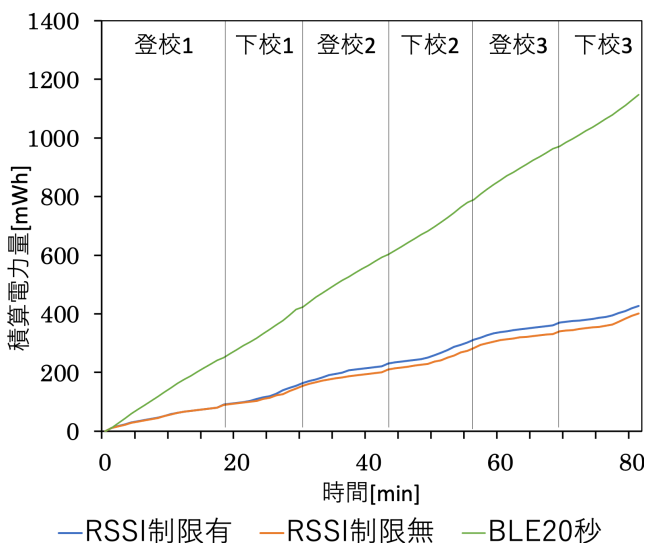


図 26 BLE・GPS・通信に使用した消費電力

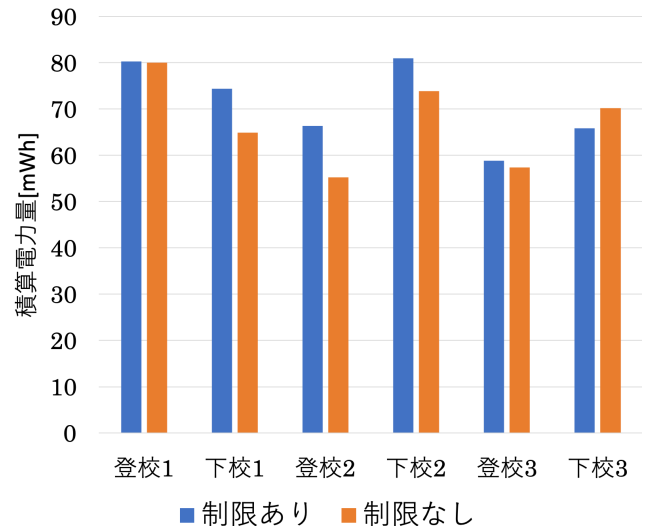


図 27 実験毎の BLE・GPS・通信に使用した消費電力

BLE と GPS 消費電力量の分析

次に BLE の消費電力量と GPS の消費電力量について分析を行う。図 28 と図 29 はそれぞれ、1 分間の BLE と GPS の消費電力量を表している。縦軸は 1 分間の消費電力量を表し、横軸は実験開始からの経過時間を表す。図 28 から、少人数で歩行している、登校の始まりと下校の終わり付近の使用時間が長く、大人数で歩行している、登校終わりと下校始まり付近の使用時間が短いことがわかる。このことから、提案方式で BLE の通信を 21[秒] になる前に BLE の電波を停止した状態でも、測位代行が行われていることがわかる。図 29 から BLE の使用時間は、RSSI 値のフィルタリングの有無に関係なく、下校時に BLE の消費電力量が増加していた。1 分間の登校時と下校時の平均消費電力量を求めた。登校時の RSSI 値でフィルタリングを行う機器は 0.94[mWh]、フィルタリングを行う機器は 1.11[mWh] に対し、下校時の RSSI 値でフィルタリングを行う機器は 1.59[mWh]、フィルタリングを行う機器は 1.57[mWh] となり、下校時に BLE の消費電力量が増加していることがわかる。

下校時に BLE 通信時間が増加した原因として、測位代行による位置情報の誤差が挙げられる。図 30 は実験で取得した情報を matplotlib を使用し、可視化したものである。分かれ道で通信不可と予測された場合、測位代行を行わない。この場合は次の通信可能な台数を予測する際に、個別のセンサデータを使用する。しかし、分かれ道で通信可能と予測され、BLE 通信を行い、IoT 機器同士が通信できた場合は測位代行を行う。測位代行が行われると、通信できた IoT 機器の中から、1 台の IoT 機器のセンサデータを使用する。そのため、次の通信可能台数の予測に、同じセンサデータを使用することになり、通信できない状況でも通信可能と予測されてしまう。この誤差により、次の BLE 通信ではタイムアウト時間まで行っていた。また、分

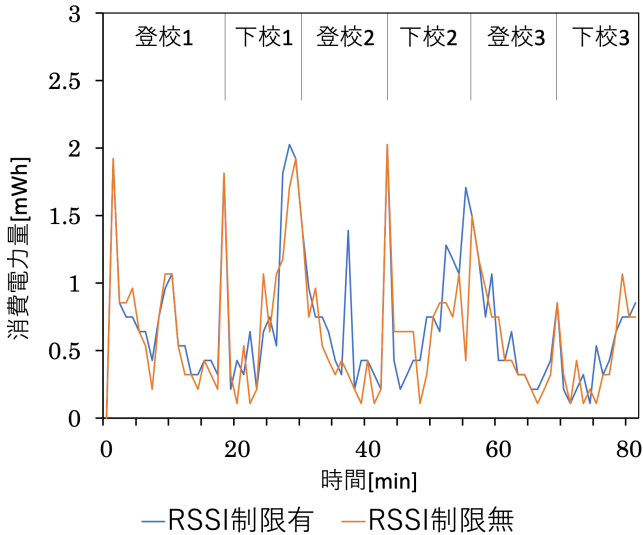


図 28 GPS の消費電力量

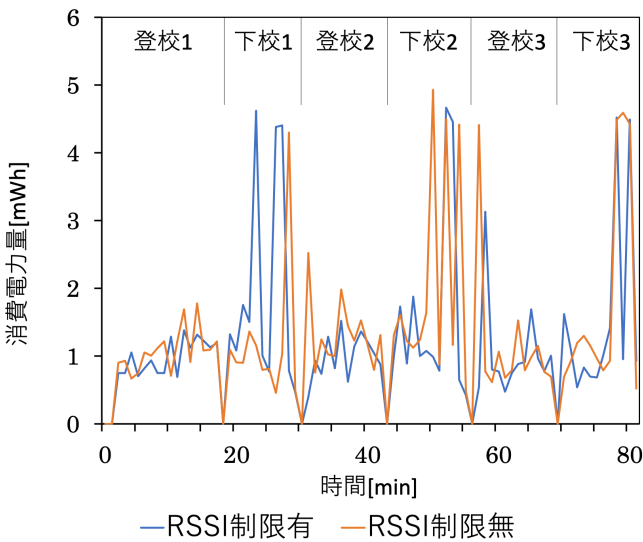


図 29 BLE の消費電力量

かれ道で BLE 通信できないこともあり、タイムアウト時間まで BLE 通信を行っていた。これらの状況が発生していたため、下校時の BLE 通信時間が増加した。これらの状況は、RSSI 値でフィルタリングを行なった機器は 6 回、フィルタリングを行わない機器は 4 回発生していた。

図 31 は提案手法の RSSI 値によるフィルタリングによる効果を示す。このとき、RSSI 値でフィルタリングを行わなかった IoT 機器は、2 つの IoT 機器が互いに通信可能と予測されていたが、実際に通信することが出来ず、タイムアウト時間まで BLE 通信を行なった。一方、RSSI 値でフィルタリングを行なった IoT 機器は、通信が出来ないと予想をしていたため、BLE 通信を行わなかった。そのため、BLE 通信の消費電力を削減することができた。RSSI 値でフィルタリングを行なった機器は実験中に図 31 の状況が 2 回発生していた。

測位代行を行い、RSSI 値でフィルタリングを行った機

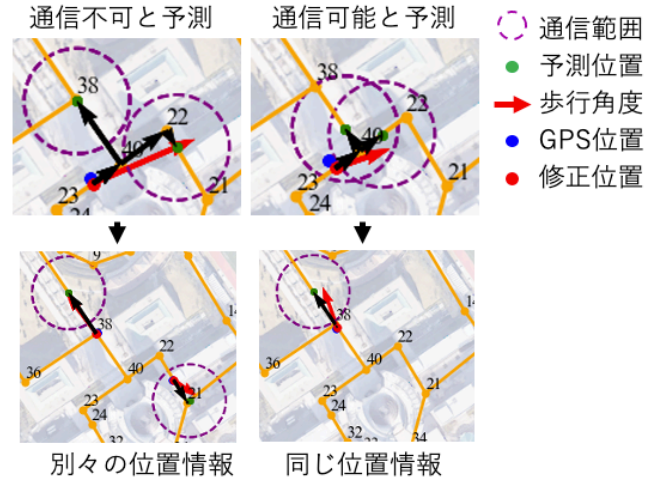


図 30 測位代行による位置情報の誤差

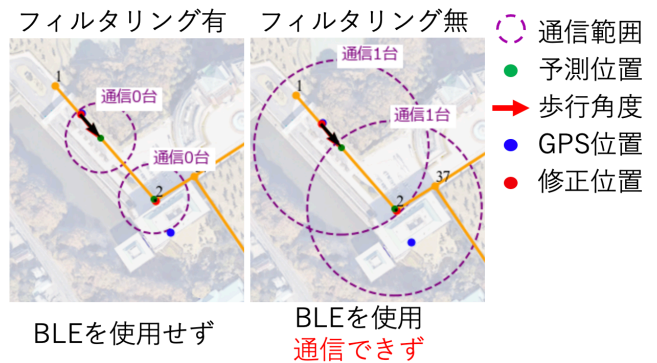


図 31 RSSI 値のフィルタリングによる効果

器がフィルタリングを行わない機器の積算電力量を上回った原因として、フィルタリングを行うことで測位代行数が減ったことが挙げられる。GPS の使用回数とサーバ送信回数は RSSI 値でフィルタリングを行う機器は 204 回、RSSI 値でフィルタリングを行わない機器は 184 回と、フィルタリングを行う機器は 20 回多くなった。その他の原因として、図 32 に示すように、RSSI 値でフィルタリングを行わない機器は、測位代行を行う範囲が広く、BLE 通信した相手の位置情報を使用する場合、実際の位置から大きく移動してしまう。移動した先の歩行可能ルートに交差点の通過情報が無い場合は BLE を使用せず GPS を使用する。そのため、BLE の消費電力を抑えることができた。この状況は実験中、3 回発生していた。

6. 議論

本稿では、子供見守り用の位置情報の送信を行う IoT 機器の測位代行における、周囲に通信可能な IoT 機器がない場合でも BLE のアダプタイズとスキャンを停止することができず、電力を消費し続けてしまう課題に対して、BLE 通信を行う際の位置情報を予測し、通信可能な IoT 機器台数に応じて BLE 通信を停止をする手法を提案している。しかし、図 30 と図 32 で示す様に、通信できた IoT 機器



図 32 測位代行後による位置情報の移動

の中から、1 台の IoT 機器のセンサデータを使用するため、次回の通信可能台数の予測に、同じセンサデータを使用することになり、通信できない状況でも通信可能と予測されてしまう。この問題を解決するには、測位代行によって移動した位置情報が通学路とは異なるルートの場合に BLE 通信をせず、GPS で取得するのが良いと考える。また、BLE 通信のタイムアウト時間を動的に変更し、BLE の消費電力を削減する手法も考える。実験結果から、BLE 通信を行い、タイムアウト時間まで BLE 通信を行った時間を除いて、BLE 通信終了時間の平均を求めた所、RSSI 値でフィルタリングを行った機器は 1.89[秒]、フィルタリングを行わなかった機器は 1.84[秒] となり、最長時間はフィルタリングを行った機器で 9.98[秒]、フィルタリングを行わなかった機器は 18.48[秒] となった。しかし、通信可能な機器の予測台数に誤差が発生した場合、提案手法では常に 21[秒]BLE 通信を行っている。通信可能な IoT 機器が無い状態で、21[秒]BLE 通信を行うのは、BLE の消費電力に無駄が発生してしまう。そのため、過去の平均通信終了時間を使用し、BLE タイムアウト時間を動的に変更できれば、消費電力を更に削減できると考える。

7. おわりに

本稿では、子供見守り用の位置情報の送信を行う IoT 機器の測位代行における、周囲に通信可能な IoT 機器がない場合でも BLE のアドバタイズとスキャンを停止することができず、電力を消費し続けてしまう課題に対し消費電力を削減することを目的としている。そこで、BLE 通信を行う際の位置情報を予測し、通信可能な IoT 機器台数に応じて BLE 通信を停止をする手法を提案した。位置情報の予測では、地磁気センサと GPS 受信機から得られたデータを使用し、歩行可能ルートへマップマッチングを行う。予測中に交差点を通過するときは頻度が高い歩行した経路に沿って、予測を行った。BLE 通信可能な機器が周囲に無くなった場合は、BLE の電波を止め、BLE の消費電力を削減することに成功した。BLE の通信時間が 21[秒] 固定の機器と提案手法の消費電力を比較した所、BLE の通信時間を 21[秒] 固定の機器と比較して提案手法は 65%消費電力

を削減できた。

謝辞 本テクニカルレポートの執筆にあたりご助言を賜りました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の杉本一彦さんに感謝申し上げます。また実験にご協力いただきました東京工科大学コンピュータサイエンス学部の小林峻さん、高橋風太さん、廣居舜佑さん、山本拓海さん、梅田拓哉さんにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Al-Mazloum, A., Omer, E. and Abdullah, M. F. A.: GPS and SMS-Based Child Tracking System Using Smart Phone, pp. 238 – 241 (2013).
- [2] Rajaiyan, A. and Sobati-Moghadam, S.: Optimized Power Consumption Formula for Designing IoT-Based Systems, pp. 74–77 (2022).
- [3] Pang, Y., Ding, H., Liu, J., Fang, Y. and Chen, S.: A UHF RFID-Based System for Children Tracking, pp. 5055–5064 (2018).
- [4] 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).
- [5] Raskovic, D. and Giessel, D.: Battery-Aware Embedded GPS Receiver Node, pp. 1–6 (2007).
- [6] Ministry of Education, Culture, S. S. and Technology: 学校安全の推進に関する計画に係る取組状況調査、都道府県・政令市教育委員会作成資料 (2018).
- [7] Inc., B. S.: BLUETOOTH SPECIFICATION Version 5.3 (2021).
- [8] Jeon, K. E. and She, J.: User Existence-aware BLE Beacon Firmware for Extended Battery Lifetime, *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/WCNC.2019.8886141 (2019).
- [9] Xiao, Z., Wen, H., Markham, A. and Trigoni, N.: Lightweight map matching for indoor localisation using conditional random fields, *IPSN-14 Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 131–142 (online), DOI: 10.1109/IPSN.2014.6846747 (2014).
- [10] Du, H., Zhang, C., Ye, Q., Xu, W., Kibenge, P. L. and Yao, K.: A hybrid outdoor localization scheme with high-position accuracy and low-power consumption, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2018, No. 1, pp. 1–13 (2018).
- [11] 高橋祐之介, 河竹純一, 串田高幸: 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, CDSL テクニカルレポート (2022).
- [12] : Bluetooth Low Energy performance and robustness analysis for Inter-Vehicular Communications, *Ad Hoc Networks*, Vol. 37, pp. 76–86 (2016). Special Issue on Advances in Vehicular Networks.
- [13] Bronzi, W., Frank, R., Castignani, G. and Engel, T.: Bluetooth low energy for inter-vehicular communications, *2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pp. 215–221 (online), DOI: 10.1109/VNC.2014.7013351 (2014).
- [14] Yozevitch, R., Ben-Moshe, B. and Dvir, A.: GNSS Accuracy Improvement Using Rapid Shadow Transitions, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Sys-*

- tems*, Vol. 15, No. 3, pp. 1113–1122 (online), DOI: 10.1109/TITS.2013.2294537 (2014).
- [15] 小林竣, 杉本一彦, 串田高幸: 自律航法に基づく省電力な測位と歩行時補正による精度の改善, CDSL テクニカルレポート (2022).
- [16] 坂井丈泰: GPS/GNSS の基礎知識, *TEXT for GPS/GNSS SYMPOSIUM*, pp. 229–230 (2007).
- [17] He, R., Hu, X., Zhang, L., He, X. and Han, G.: A Combination Orientation Compass Based on the Information of Polarized Skylight/Geomagnetic/MIMU, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 10879–10887 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939591 (2020).
- [18] Frank, R., Bronzi, W., Castignani, G. and Engel, T.: Bluetooth Low Energy: An alternative technology for VANET applications, pp. 104–107 (2014).
- [19] Yu, B., Xu, L. and Li, Y.: Bluetooth Low Energy (BLE) based mobile electrocardiogram monitoring system, *2012 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 763–767 (online), DOI: 10.1109/ICInfA.2012.6246921 (2012).
- [20] 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).
- [21] Gebre-Egziabher, D., Elkaim, G., Powell, J. D. and Parkinson, B.: A non-linear, two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers, *8th International St. Petersburg Conference on Navigation Systems (IEEE/AIAA)* (2001).
- [22] Sachi, M.: A Study on the Welfare City Planning from the view-point of school children, *Journal of social welfare studies, Shimane University*, pp. 18–35 (2008).