

配布型BLEタグとタンデムスキャナを用いた 屋内位置推定手法

浦野 健太^{1,a)} 廣井 慧¹ 梶 克彦² 河口 信夫^{1,3}

受付日 2018年4月11日, 採録日 2018年10月2日

概要: 物流や人流の管理において、動線の可視化や移動の効率化、ナビゲーションの提供を行うためには屋内位置推定が必要となる。精度やコストが異なる様々な手法が提案されているが、特にイベント来場者の行動分析では、準備期間が短いため事前計測が必要な手法や、多数の機材を設置する手法の適用は難しい。本論文では、少ない事前準備で高精度な推定を実現する、配布型 Bluetooth Low Energy (BLE) タグを利用した屋内位置推定手法を提案する。提案手法は BLE パケットを収集するスキャナを環境固定とし、BLE タグを来場者が持ち運ぶ形式としてタグの配布のみで推定を利用可能とした。位置推定は事前計測を必要としない3点測位とパーティクルフィルタを組み合わせたアルゴリズムを用い、変更可能な複数のパラメータを導入してグリッドサーチにより精度を向上させられるようにした。また、パケットロスの発生による精度の低下を防ぐため、複数の Bluetooth アダプタを1台に備えるタンデム BLE スキャナを開発した。日本科学未来館で開催された G 空間 EXPO2016 においてデータ収集実験を行い、精度を検証したところ平均誤差 3.6 メートルを達成した。

キーワード: 位置推定, 展示会, BLE, タンデムスキャナ, 固定型スキャナ, 配布型 BLE タグ

A Location Estimation Method using Mobile BLE Tags with Tandem Scanners

KENTA URANO^{1,a)} KEI HIROI¹ KATSUHIKO KAJI² NOBUO KAWAGUCHI^{1,3}

Received: April 11, 2018, Accepted: October 2, 2018

Abstract: In this paper we propose an indoor location estimation method using mobile Bluetooth Low Energy (BLE) tag, which can achieve estimation higher accuracy with less labor. To track the activities of people indoors, such as trajectory of walking or interest, location estimation technology is essential. To activate the estimation system in short preparatory phase, the methods which need fingerprinting or many devices is hard to use. To use for the survey of the activities of the visitors at a large-scale exhibition, proposed method is designed to use BLE packet scanners which are fixed to the target area and mobile BLE tags which are carried by the visitors. Estimation algorithm is based on the combination of trilateration and particle filter to avoid signal strength investigation, and has several parameters to control the algorithm's behavior. We develop tandem BLE scanner which has multiple Bluetooth adapters on one scanner to mitigate the effect of frequent packet loss. We have executed data collection experiment at G-EXPO2016 in Miraikan museum, Tokyo, Japan. The mean estimation error of the proposed method is around 3.6 meters.

Keywords: location estimation, exhibition, BLE, tandem scanner, fixed scanner, mobile BLE tag

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya,
Aichi 464-8603, Japan

² 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technol-
ogy, Toyota, Aichi 470-0392, Japan

³ 名古屋大学未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya Univer-
sity, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

a) vrano@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

人の移動において、効率良く移動できる経路の利用や、混雑の回避、未知の場所へのナビゲーションは、人の集まる場所や環境中の物品の配置に影響を受けるため、注意深く動線を設計しなければならない。特に、多くの人々が来場する展示会、即売会、博覧会などのイベントにおいては、様々な計測手段により人がどのように移動しているかを可視化・解析する手法（人流解析）が必要である。人流解析により、人気の展示や移動経路などの来場者の動向を把握し、展示ブースの配置の最適化や展示内容の調整が可能になる。混雑の解消を目的とした人流解析では、どの通路が多くの人に利用されているかを調べればよい。一方、人気展示の調査・訪問した展示ブース間の共起関係、およびそれらの年齢・性別・職業による変化のような来場者の動向を調査するには、来場者を会場内全域で継続的にトラッキングして、どの展示ブースにどれだけの時間滞在したかを調査しなければならない。この実現には位置推定技術が必要で、屋外での位置推定ではGPSの利用が一般的であり、スマートフォンでもマップアプリやライフログアプリなどで利用可能である。

一方、屋内で開催されるイベントでは、衛星からの信号が建物で減衰し十分な精度を得られないため、GPSに頼らない屋内位置推定手法が必要となる。屋内位置推定手法は従来から様々なものが提案されているが、我々は高い推定精度に加え、イベントにおける人流解析・位置推定では以下の3点が重要だと考える。

- (a) 多数の人からのデータ収集が容易。
- (b) 機材の設置などの事前準備が容易。
- (c) 機材設置場所による精度変化が少ない。

(a) 人流解析として意味のあるデータ分析を行うためには、多数の来場者からデータを取得する必要がある。(b) 短い準備期間の間に広い会場で多数の機材を設置したり、計測を行ったりすることが難しいため、なるべく簡易な手法を採用しなければならない。また、撤収も容易に行えなければならない。(c) さらに、展示物や通路スペースにより機材の設置場所が限られるため、機材設置場所による精度変化が小さいことも重要となる。

これらの条件を満たせる技術として、本論文ではBluetooth Low Energy (BLE) 技術に着目し、絶対測位による屋内位置推定を行う。一般的なBLE位置推定のシステム構成では、環境固定のBLEビーコンからの電波をスマートフォンで観測する。このシステム構成では、数メートルおき、または展示ブースごとにBLEビーコンを設置し、受信信号強度で近傍にあるBLEビーコンの位置を利用して推定を行うが、次の理由で(a)および(b)を満たせない。(a) スマートフォン用アプリケーションが必要となる位置推定手法はスマートフォンを持たない人や、アプリケーション

の動作による端末のバッテリー持続時間への影響を嫌う人を対象にできない。(b) イベント会場に多数のBLEビーコンを設置すると、敷設や回収などの管理が煩雑になる。

我々はより簡単な事前準備で位置推定を行えるシステム構成として、来場者が携帯する配布型BLEタグと環境固定型のBLEスキャナを用いる屋内位置推定を提案する。この構成では先にあげた条件を満足する：(a) BLEタグの配布のみで位置推定が可能であり、(b) 比較的少ない台数のBLEスキャナで会場全域をカバーでき、(c) 遮蔽物を避けた配置や詳細な位置調整をしなくても精度を維持できる。

同じシステム構成をとった研究[1]では老人ホーム入居者のアクティビティトラッキングを目的として、最も強い受信信号強度を記録したBLEスキャナのあるエリアを推定位置とするエリア単位の位置推定を行っている。しかし、この手法を展示会で利用しようとする、展示ブースごとにBLEスキャナを設置する必要が生じ、機材数の増加や管理の煩雑化を招くうえ、来場者の移動経路を追跡しての動線計測が難しい。そこで、本論文では各BLEスキャナで得た受信信号強度から対象の位置を直接計算し、展示ブースごとのBLEスキャナ設置を必要とせず具体的なx, y座標で継続的に推定を行い、来場者の移動経路も追跡できる手法を提案する。本論文では事前準備のコストを抑えるため、事前計測による電波環境のモデリングは行わない。また、BLEの通信は環境によらず信号強度が不安定で、パケットロスも発生する。パケットロス自体は環境に関係なく発生するが、展示会の環境では多くの人や機材の存在により不安定になると考えられるため、対策を講じなければ安定した推定を行うことが難しい。

提案手法では安定した位置推定のためハードウェア、アルゴリズムの両面で工夫を行った。ハードウェア面では、BLEタグからのBLEパケットを受信するBLEスキャナにRaspberry Piと市販のBluetoothアダプタを利用した。さらに、BLEパケットがBLEスキャナで観測されずパケットロスとなる状況を減らすため、タンデムBLEスキャナを構築した。タンデムBLEスキャナは1台のBLEスキャナに複数のBluetoothアダプタを備え、あるBluetoothアダプタがBLEパケットを受信できなくても他で受信できればパケットロスとならない。アルゴリズム面では3点測位をベースとして、頑健性の向上のためにパーティクルフィルタを用いて位置推定を行った。さらに、推定で利用する関数にパラメータを導入して挙動を制御できるようにし、環境ごとの最適化を行えるようにした。

推定精度の評価には、実際の展示会であるG空間EXPO 2016 [2]での実験で得たデータを用いた。このデータに対してパラメータの最適化を施して位置推定を行ったところ平均誤差3.6メートル程度で対象となる人の位置を推定できた。また、配布型BLEタグのBLEパケット送信周期や、会場内に設置するBLEスキャナの台数などの機材設

定の変更を行ったところ、推定精度が変化した。

本論文における主な貢献は、(1) 大規模展示会での利用を想定した、配布型 BLE タグによる位置推定システムを提案し、(2) タンデム BLE スキャナの利用による安定した BLE パケットの受信と高精度な推定を行い、(3) 展示会来場者の移動軌跡を実用上十分な精度で推定した、の3点である。

本論文の構成は次に示すとおりである。まず、屋内位置推定に関する研究を2章で紹介する。3章では提案する屋内位置推定手法について述べる。4章では日本科学未来館で行われた展示会 G 空間 EXPO 2016 において行ったデータ収集実験と、収集データに対する基礎分析を行い、提案手法を適用して推定精度の評価を行う。最後に5章でまとめと今後の展望を述べる。

2. 関連研究

屋内位置推定手法には、スマートフォンに代表される個人所有の端末を利用するものや、環境設置型の計測機材を利用するものなど、様々なものが提案 [3], [4] されている。本章では、主に電波を用いるものについて述べる。

2.1 Wi-Fi ベース

Wi-Fi アクセスポイントからの信号強度を利用した位置推定は、Wi-Fi 環境の普及にともなって精力的に研究が行われている。設置済みの Wi-Fi アクセスポイントを利用でき、新しく機材を導入せずに推定を行えるという利点がある。主として用いられる方式は RADAR [5] に代表される fingerprint となっている。位置推定を行う環境内の各所で事前計測を行い、Wi-Fi 信号の特徴をモデル化したマップ (fingerprint) を作成するため、Wi-Fi アクセスポイントの場所が既知である必要がない。実際の推定では Wi-Fi のスキャンデータと fingerprint をマッチングする。fingerprint の表現には様々な工夫 [6] が施されており、クラスタリングを利用するもの [7] や、事前計測が存在しない場所における受信信号強度の表現や計算量の削減のために Gaussian Mixture Model (GMM) [8] や Gaussian Process (GP) [9] を利用するものがある。

一方、数メートルおきに計測が必要な fingerprint 作成の労力は大きい。Wi-Fi アクセスポイントの故障や交換、移動で fingerprint が不正確になるという問題もあり、自動的な fingerprint の更新 [10] で精度の低下を防ぐ手法が提案されている。さらに、fingerprint 作成時は人が信号に影響するため、同じ地点で方向を変えて数回計測を行う [5]、人体による電波の減衰モデルを用いて精度の低下を抑えつつ省力化する [11] など、様々な対策が講じられている。しかし、省力化してもなお事前計測は必要であり、展示会の開始までの短い準備期間での fingerprint の作成は難しい。また展示ブースの構築にともなって電波の反射なども変化し、fingerprint が本番環境を反映しないものになる。これ

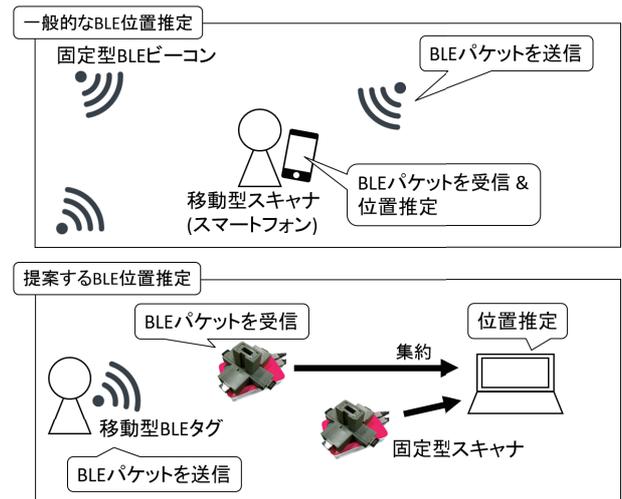


図 1 BLE 位置推定のシステム構成

Fig. 1 System configuration of location estimation with BLE.

らは展示会における fingerprint の利用を難しくする。

また、IEEE 802.11n 規格において、Multiple Input Multiple Output (MIMO) 通信を行う際のチャネル状態 (Channel State Information; CSI) を特定の Wi-Fi 機器で取得できるツール [12] が公開されて以降、CSI を利用して様々な試みが行われている。Li ら [13] は人の存在によるマルチパス状態の変化を CSI から検出し、推定対象が端末を所持していない状況 (デバイスフリー) における位置推定を行っている。これはスマートフォンも必要ない反面、狭い環境かつ少人数における実験が主で、広大かつ多数の人がいる大規模環境への応用は難しいと考えられる。

2.2 BLE

BLE による位置推定は、利用する周波数帯やデバイスなどの類似性から Wi-Fi と似たものとなっている。2.4 GHz 帯を利用し、スマートフォンや PC で利用可能である。BLE を用いた位置推定では BLE ビーコンとスマートフォンの組合せがよく用いられる。図 1 に一般的な BLE 位置推定のシステム構成を今回提案する構成とともに示す。事前に環境中に BLE ビーコンを多数設置しておき、それらの信号をスマートフォンで受信・処理して自己位置を算出することが多い。

Faragher ら [14] は Wi-Fi fingerprint と同様に環境中に設置した BLE ビーコンからの電波をスマートフォンで計測して受信信号強度マップを作成し、50 メートル × 15 メートルのオフィス環境で 7 個のビーコンを用いて、推定位置の 95% が誤差 4.8 メートルに収まる精度を達成したと報告している。同時に BLE パケットの送信周期や送信パワーによる精度の変化にも言及している。Komai ら [1] は老人ホームにおける入居者の行動モニタリングのために、入居者の名札に入れた BLE タグからの電波を環境に固定した BLE スキャナで観測し、老人ホーム内のどのエリアに

いたかを推定した。この目的は入居者のアクティビティモニタリングだったため、エリアレベルの位置推定が必要とされ、最も強い受信信号強度を観測した BLE スキャナのあるエリアが推定位置とされた。また、石塚ら [15] は秋葉原 UDX での展示会における実験から、BLE ビーコンによる測位は受信信号強度の不安定さのために 10 から 20 メートル程度の精度となり、BLE ビーコンのみでの高い精度の実現は難しいと述べている。

2.3 RFID・UWB

Radio Frequency Identifier (RFID) は電波を用いて RFID タグと情報をやりとりし、バーコードの置き換え、物品管理や個人の識別に用いられている。Ni ら [16] は、308 MHz を利用する RFID システムを構築し、環境中に RFID スキャナとリファレンス用のアクティブ RFID タグを設置し、ターゲットになる RFID タグの位置を k 近傍法をベースとして推定する方式を採用している。しかしスキャナとタグをともに環境に配置するのは管理が難しく、また実験を行った環境もオフィスの部屋程度の大きさである。

Ultra Wide Band (UWB) は 3-10 GHz 程度の周波数で、広い周波数帯域幅 (数百 MHz から数 GHz) を利用する無線通信システムを指す。位置推定に UWB を利用する場合は、ごく短時間のパルスによる Time of Arrival (ToA) 方式を用いる。UWB で用いるパルスはその長さのためマルチパスによる直接波と反射波を判別でき、より高精度な位置推定を行える [17]。UWB を用いたシステムでは誤差数十センチメートルの精度を達成している。一方金属や液体の存在は干渉を発生させるため、多数の UWB スキャナを適切に配置して精度を維持しなければならない。

2.4 超音波・レーザレンジスキャナなどによる推定

超音波による手法では、推定対象となるノードが発する超音波を複数のレーザで受信し、その受信時刻の差から推定を行う。この手法は Time Difference of Arrival (TDoA) と呼ばれており、3 次元的な位置推定も可能である。Active Bat [18] では天井に 100 台のレーザを設置し、280 立法メートルの環境で数十センチメートルの推定精度を実現している。また、DOLPHIN [19] ではリファレンスノードを用いて他のノードの位置を推定し、同様に数十センチメートルの精度を報告している。

レーザ光を用いる手法では、レーザレンジスキャナを用いて人の位置を検出する。Zhao ら [20] は、地上近くに設置した複数のレーザレンジスキャナを用い背景との差分を抽出し、移動する人の足を検出し位置をトラッキングしている。レーザ光による物体検出は非常に高精度に動作する一方、レーザ光が物体を貫通しないため、検出対象と光源の間に障害物が存在する場合は検出対象が障害物の影に隠れてしまい (オクルージョン)、位置を検出できなくなる。

2.5 ハイブリッド手法

複数の手法を組み合わせる、より高精度な推定を目指すハイブリッド手法も提案されている。石塚ら [15] は単体では精度が不足するとして BLE ビーコンを歩行者自立航法 (Pedestrian Dead Reckoning; PDR) と組み合わせる検討を行っている。BLE ビーコンによる PDR 補間の可能性としては、(1) 相対測位である PDR は歩行開始の地点を事前に設定する必要があるため、環境の出入りに設置した BLE ビーコンにより歩行開始地点を特定する、(2) PDR の長時間利用によるセンサ誤差の蓄積を軽減するため、およびセンサの連続稼働を避け消費電力を低減させるために、BLE ビーコンによる測位を利用する、の 2 点があげられている。Ban ら [21] は PDR と磁気 fingerprint, Wi-Fi fingerprint を統合して位置推定を行っている。PDR で蓄積する誤差を軽減するために、建物の残留磁気をモデル化した磁気 fingerprint と、Wi-Fi fingerprint による絶対測位を組み合わせて、地下鉄駅において誤差 7 メートル程度の精度を達成している。これらの手法は精度の向上と引き換えに、実装の複雑化やさらなる計測が必要になるなどのデメリットがある。

2.6 現状の課題

Wi-Fi アクセスポイントからの電波強度を用いる位置推定はスマートフォン向けのアプリケーションに組み込めるため、特別な機材を使わずに位置推定を行える。一方、アプリケーション導入の煩雑さを忌避する人や、高頻度な Wi-Fi スキャンによる消費電力の増大・稼働時間への影響を懸念して位置推定を利用しない人の存在が想定される。また、スマートフォンを持たない人 (子供や老人など) は推定の対象にできない。スマートフォンアプリケーションのインストールが必要なシステム構成は、データ収集において多数の利用者を得られない可能性がある。

一方、専用の計測機器を用いる方法として、BLE タグ、RFID タグ、UWB タグ、超音波発信機やレーザセンサなども利用されている。これらの方法では位置推定用の機器を利用者に配布するだけでよいため、多くの利用者を見込める。しかし環境に設置する機材も必要で、障害物により推定可能な範囲が制限されるなどのデメリットもあるため、良好な精度を得るには設置場所や台数を細かく調整する必要がある。多数の機材を必要とする手法は、費用も高額になりやすく設置に必要な労力が大きくなる。

さらに、展示会などのイベントにおいて位置推定が難しくなる要素として、次のようなものがあげられる。

- (a) 機材の設置、撤収にかけられる時間が短い。
- (b) 展示物やパーティションが障害物となり、来場者により環境が変化する。

これらの要素は前述の多くの推定手法でも問題となる。(a) 展示会の準備 (機材の搬入やブースの設営) は短時間

で行われ、その間環境は大きく変化する。そのため広い会場において、多数のノードの適切な設置や、多数の地点で安定した計測が必要な fingerprint の作成は難しい。(b) 電波を用いる手法において、展示物やパーティションは受信信号強度を不安定にし、パケットロスが発生させる要因となる。また、展示用の機材が電波を発信して干渉を起こす可能性もある。電波を用いない場合でも障害物の影響は大きいと考えられる。また、来場者が移動してつねに環境は変化しているため、安定した計測を行うために工夫が必要となる。

3. 提案手法

本論文ではスマートフォンを必要とせず、かつ広い会場でも利用可能な位置推定手法として、配布型 BLE タグによる位置推定手法を提案する。提案する手法は、1) 配布型 BLE タグを人が持ち歩き、2) 環境固定の複数の BLE スキャナで得た BLE パケットの情報を統合して位置推定を行う。事前計測を行わない手法とし、不安定な電波環境で発生するパケットロスに対処するためにタンデム BLE スキャナを構築し、安定して BLE パケットを収集できるようにした。また、不安定性を緩和するアルゴリズムを用い、パラメータの最適化によって高い精度を達成する。

提案手法は、推定に利用するハードウェアと位置推定アルゴリズムの2つの部分から構成される。ハードウェア面では環境固定の BLE スキャナと、配布型の BLE タグを用いる。BLE スキャナは Raspberry Pi と USB 接続型の Bluetooth アダプタを用い、BLE タグは iBeacon 形式のパケットを送信するよう設定した市販品を用いる。アルゴリズム面は尤度マップ生成とパーティクルフィルタに分かれ、それぞれ BLE パケットの受信信号強度から対象 BLE タグの位置の表現と、前回位置をもとに新しい位置の推定を行う。なお、この手法は以前に提案した手法 [22] を改良したものである。本章では、まず提案手法による位置推定の流れを説明し、BLE パケットを収集する BLE スキャナについて述べる。BLE スキャナについては、パケットロスによって位置推定が不安定になるため、パケットロスへの対処として構築したタンデム BLE スキャナについても述べる。その後、位置推定アルゴリズムについて述べる。

3.1 位置推定の流れ

提案手法による位置推定は、図 2 に示す流れで行う。まず、位置推定の対象となる会場の各所に BLE スキャナを配置し、対象となる BLE タグの発する BLE パケットを収集する。収集したパケットは推定の各時刻における尤度マップの生成に利用する。尤度マップの生成では、収集した BLE パケットの信号強度をもとに各スキャナから対象 BLE タグまでの距離をそれぞれ推定し、会場内のどこに対象 BLE タグがあるかを表現するマップを作る。パーティ

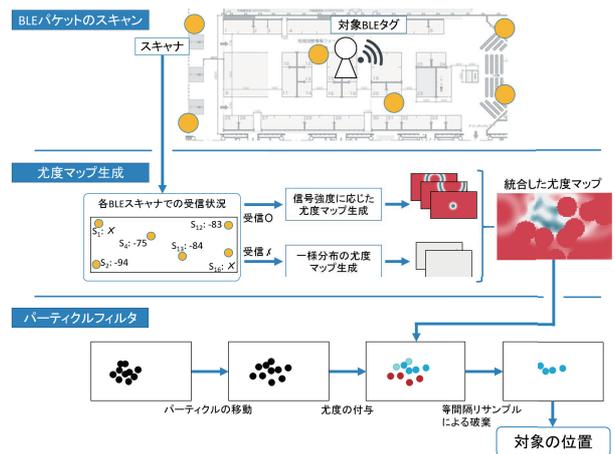


図 2 提案手法による位置推定の流れ

Fig. 2 Overview of location estimation by proposed method.



図 3 BLE スキャナ

Fig. 3 BLE scanner.

クルフィルタは、多数の粒子を利用して最終的な推定位置を出力する。BLE パケットの信号強度は不安定であり、尤度マップがタイムステップごとに大きく変化する場合があるため、前回位置からの移動をパーティクルフィルタで表現する。前回位置をもとにランダムに移動させたパーティクルに対して、尤度マップを用いて重みを付与し、重みに応じてパーティクルを破棄し、残ったパーティクルの位置をもとに推定位置を出力する。

3.2 BLE スキャナと収集 BLE パケット

会場内に設置する BLE スキャナは、Raspberry Pi を利用する (図 3 に外見を示す)。OS には Raspbian を使用する。BLE パケットの収集は、Linux 向け Bluetooth プロトコルスタック BlueZ を介して、本体に取り付けた市販の PC 向け Bluetooth アダプタを操作して行う。BLE スキャナはパッシブスキャンのみを行う。収集する BLE パケットは BLE のアダプタイジングチャンネル (チャンネル 37, 38, 39) に送信される任意のパケットであるが、本論文では BLE タグが iBeacon 形式のパケットを送信すると想定する。スキャナは、収集した BLE パケットに受信時刻とホスト名を加えたデータを生成し、ログ収集ツール fluentd でサーバに集約する。

3.3 タンデム BLE スキャナによるパケットロス対策

3.3.1 パケットロスについての考察とタンデム BLE スキャナの構築

BLE の通信では、しばしばパケットロスが発生する。パケットロスが多い環境では、位置推定に必要となるデータを得られず、推定が不安定になるか、行えなくなってしまう。パケットロスの原因は複数考えられ、その1つに、BLE パケットが BLE スキャナに到達した時点で、BLE スキャナが違うチャンネルを監視している可能性がある。BLE の仕様では、機器どうしの発見や、ブロードキャスト情報を送信するためのチャンネルが3つ用意される。これらのチャンネルはパケットの衝突や他の電波の干渉を避け、安定した通信を行うためにパケットの送信ごとにランダムに変更することが望ましい。しかし、BLE パケットは同時に複数のチャンネルには送信できず、スキャンも同時に複数のチャンネルに対しては行えない。また、スキャンはスキャン窓を用いて時分割で各アダプタイジングチャンネルに対して行うが、各スキャン窓では前回と異なるチャンネルを選択する仕様となっている。したがって、1つの BLE スキャナを利用する場合、アダプタイジングチャンネルの網羅的な監視は不可能である。一方、異なる機器では同時に違うチャンネルに対してスキャンが行われる可能性があるため、複数のチャンネルをスキャンできるように Bluetooth アダプタ数を増やしたタンデム BLE スキャナを製作してパケットロスの低減を図ることにした。

我々が実験で利用する BLE スキャナは、1台の Raspberry Pi が1つの Bluetooth アダプタを制御するが、実際には複数台の Bluetooth アダプタを個別に制御可能である。そこで Raspberry Pi 3 に複数の Bluetooth アダプタを取り付け、BLE パケットを記録できるタンデム BLE スキャナを構築した。BLE パケットの収集プログラムにも変更を加え、Bluetooth アダプタごとにスレッドを生成して、USB バスの専有以外で可能な限り処理の並列性が高まるようにし、BLE パケットの受信時には受信時刻とホスト名に加え、受信した Bluetooth アダプタの番号を追加する。ここで、通常のスキャナ (1台の Raspberry Pi に1つの Bluetooth アダプタ) ではなく1台の Raspberry Pi に複数の Bluetooth アダプタを用いる理由は、(1) 機器の価格、(2) 利用に必要な電源と LAN ケーブル、(3) スキャナの管理 (使う台数分設定が必要) の3点を考慮してである。Raspberry Pi に接続する Bluetooth アダプタの個数や配置は自由であるが、Raspberry Pi が備える USB ポートが4口であるため、4つ以上の Bluetooth アダプタを利用する場合は USB ハブを介さなければならない。

3.3.2 パケットロス低減に関する予備実験

タンデム BLE スキャナのプロトタイプとして、図4に示すものを作成した。このタンデム BLE スキャナは、7個の Bluetooth アダプタを USB ハブ経由で Raspberry Pi



図4 7個の Bluetooth アダプタを取り付けたタンデム BLE スキャナ

Fig. 4 Tandem BLE scanner with 7 Bluetooth adapters.

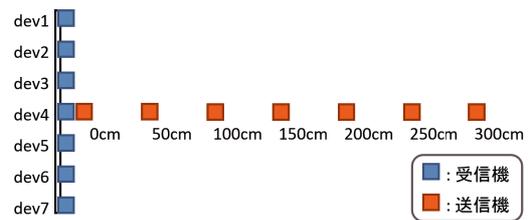


図5 送信機に対する受信機の配置

Fig. 5 Locations of the scanner and the sender.

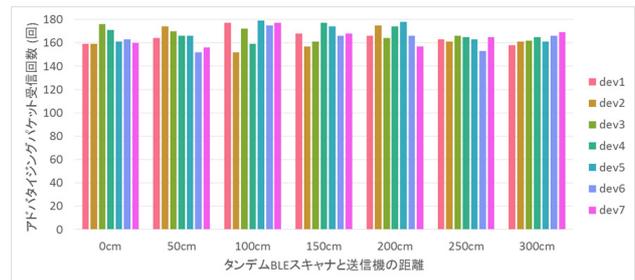


図6 BLE パケットの受信回数

Fig. 6 The number of received BLE packets.

に接続し、延長ケーブルを介してシャフトに一列に固定する構成である。Bluetooth アダプタの間隔は、試験的に12.5センチメートルとした。このタンデム BLE スキャナを用いて、送受信間の距離を変化させつつパケットの受信回数を調査した。送信側は通常 BLE スキャナと同じ構成の機材で BLE パケット送信用のプログラムを動作させ、iBeacon と同じ形式の BLE パケットを送信した。

図5に示すように、タンデム BLE スキャナの7個の Bluetooth アダプタのうち中央 (dev4) の正面に送信機を設置した。実験に利用した環境は、机・壁・ディスプレイなどを含む室内である。BLE パケットは送信パワー (iBeacon パケットに含まれる値) を -59 dBm とし、1 Hz で送信した。この際、送受信間の距離を0 cm から50 cm 刻みで300 cm まで位置を移動させ、各 Bluetooth アダプタでの BLE パケット受信回数について、180 秒間記録をとり図6にまとめた。

図 6 より送受信間の距離が非常に近くても、180 秒で送信される 180 個の BLE パケットすべてが受信されるわけではないといえる。しかし、毎秒の各 Bluetooth アダプタでの受信状況を確認したところ、タンデム BLE スキャナのすべての Bluetooth アダプタで BLE パケットを受信していない時刻はなかったため、タンデム BLE スキャナの利用によりパケットロスを減らせると考えられる。

3.4 位置推定アルゴリズム

位置推定アルゴリズムは尤度マップ生成とパーティクルフィルタの 2 パートに分かれる。信号強度は送受信間の距離に依存して減衰するため、会場内のある位置から送信された BLE パケットに対しては、各 BLE スキャナが記録する受信信号強度はそれぞれ異なり、送信位置に応じた特徴を示すはずである。尤度マップの生成では各 BLE スキャナで得た BLE パケットの受信信号強度をもとに会場内において対象の BLE タグがあると思われるおおよその位置を表現する。一方、対象となる BLE タグの移動は前回の位置の近傍に絞られるため、パーティクルフィルタでは前回の位置をもとに今回推定する位置の候補をパーティクルの散布で表現し、尤度マップの情報を用いて最終的な推定位置を出力する。

3.4.1 尤度マップ生成

尤度マップ生成では会場を正方形のセルで区切り、各セルにおいて対象 BLE タグの有無についての尤度を与える。会場を距離 d_{cell} ごとに区切り、1 つのセルを $c_{i,j}$ で表現する。 i と j はそれぞれ x 方向のインデックス、 y 方向のインデックスとする。各セルが指す実際の位置 $(x_{c_{i,j}}, y_{c_{i,j}})$ は各方向のインデックスにセルの 1 辺のサイズ d_{cell} をかけて $(i \times d_{cell}, j \times d_{cell})$ となる。また、会場内にある BLE スキャナの台数を $N_{scanner}$ とし、1 つの BLE スキャナとその設置場所を s_k ($k = 1, 2, \dots, N_{scanner}$) および (x_{s_k}, y_{s_k}) とする。

まず、各 BLE スキャナごとの尤度マップを作成する。最初に、時刻 t における BLE スキャナ s_k の尤度マップ作成に必要な受信信号強度 $R_{s_k}^t$ を抽出する。これは式 (1) で表される。

$$R_{s_k}^t = f(r_{s_k}^{t'}) \quad (1)$$

$t-w < t' \leq t$

この抽出は窓幅 w のスライド窓を利用し、時刻 $t-w$ から t までの BLE パケットの記録 $r_{s_k}^{t'}$ を関数 f に与えて行う。窓幅 w は変更可能なパラメータとした。大きな w を与えるとより長い期間の受信信号強度から位置を推定する。窓のスライド幅は推定の頻度を決定する。スライド幅に w を与えた場合、各窓で参照される BLE パケットの記録は重複しない。スライド窓の利用により、パケットロスの影響の緩和や、受信信号強度の不安定さへの対処が可能

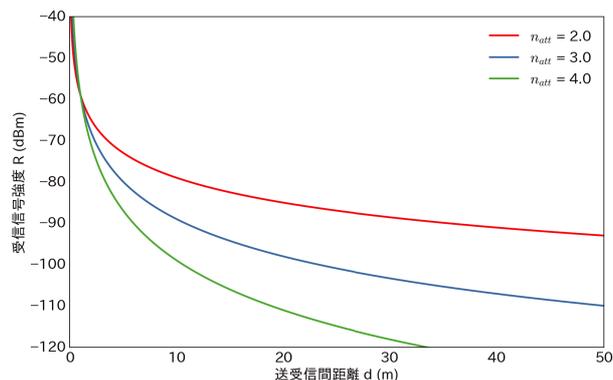


図 7 減衰定数 n_{att} による受信信号強度 R と距離 d の関係の変化
 Fig. 7 Relation between signal strength and distance by different attenuation constant.

になる。ふつう窓内には複数の BLE パケットがあるため、それらの受信信号強度について最大や平均などの関数 f を適用し $R_{s_k}^t$ とする。実際の推定における $R_{s_k}^t$ 抽出用の関数については 4.3.2 項で述べる。

受信信号強度 $R_{s_k}^t$ の抽出後、式 (2) を用いて、 $R_{s_k}^t$ から考えられる BLE タグと BLE スキャナ s_k の間の距離 d_{est} を算出する。この式は距離による受信信号強度の減衰をモデル化し、2 つのパラメータ Tx と n によって制御される。 Tx は送信パワーで、送受信間の距離が 1 メートルのとき観測されるべき受信信号強度である。本論文で想定する iBeacon 形式の BLE パケットでは、パケット内に Tx を含む。 n_{att} は減衰定数で、距離によってどれくらい受信信号強度が減衰するかを決める。式 (2) を変形すると、ある距離 d 離れたところから送信された BLE パケットの受信信号強度 R は式 (3) で表現される。この式 (3) について、送信パワーを $Tx = -59$ [dBm] に固定し、減衰定数 n_{att} を変化させたときのグラフを図 7 に示す。減衰定数 n_{att} が大きいほど減衰が強くなり、短距離で大きく受信信号強度が変化する環境に対応する。

$$d_{est} = 10^{\frac{R_{s_k}^t - Tx}{-10n_{att}}} \quad (2)$$

$$R = Tx - 10n_{att} \log_{10} d \text{ [dBm]} \quad (3)$$

式 (2) を用いて推定した BLE タグと BLE スキャナとの距離は誤差を含むと考えられる。そこで、推定距離 d_{est} を平均値に持ち、標準偏差 σ の正規分布を用いて誤差を考慮する。大きい σ は受信信号強度が不安定な環境に対応する。この正規分布の確率密度関数 $f_N(d)$ は式 (4) で表される。

$$f_N(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(d - d_{est})^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (4)$$

また、BLE スキャナに対する対象 BLE タグの方向 (BLE パケットの到来方向) は分からないため、1 台の BLE スキャナによる尤度マップは BLE スキャナ位置を中心として同心円状になる。したがって、位置 $(x_{c_{i,j}}, y_{c_{i,j}})$ を持つ

セル $c_{i,j}$ について、位置 (x_{s_k}, y_{s_k}) の BLE スキャナ s_k によって与えられる尤度 $l_{c_{i,j}, s_k}$ は次の式 (5) で表される。ここで ω_R は受信信号強度に応じた重みとして式 (6) で表され、受信信号強度が強いほど大きな値となる。

$$l_{c_{i,j}, s_k} = \omega_R \cdot f_N \left(\sqrt{(x_{s_k} - x_{c_{i,j}})^2 + (y_{s_k} - y_{c_{i,j}})^2} \right) \quad (5)$$

$$\omega_R = \frac{100 + R_{s_k}^t}{10} \quad (6)$$

一方、時刻 $t-w$ から t までの間で BLE スキャナ s_k が BLE パケットを受信しなかった場合は、そのスキャナに対する尤度マップに一様分布を与える。この際、あるセル $c_{i,j}$ に与えられる尤度 $l_{c_{i,j}, s_k}$ は、式 (7) のようになる。ここで N_{cell} は会場をセルで分割したときの総セル数である。

$$l_{c_{i,j}, s_k} = \frac{1}{N_{cell}} \quad (7)$$

最終的に、時刻 t において会場内のあるセル $c_{i,j}$ に対して割り振られる尤度は、各スキャナによって与えられた尤度 $l_{c_{i,j}, s_k}$ の総和として式 (8) で与えられる。

$$l_{c_{i,j}}^t = \sum_k l_{c_{i,j}, s_k} \quad (8)$$

3.4.2 パーティクルフィルタ

パーティクルフィルタは、対象 BLE タグについて時刻 $t-1$ での推定位置からの移動先（時刻 t での推定位置）を多数の粒子で表現する。ここでは N_p 個のパーティクルを利用するものとする。時刻 t においてあるパーティクルが位置 (x_p^t, y_p^t) を持ち、方向 θ_p^t (度) を向いているものとする。この位置と方向は、時刻 $t-1$ での位置と方向から決定され、以下の式 (9) から式 (11) で表される。ここで、 d_m は 1 タイムステップでパーティクルが移動可能な最大距離を表す。ここで、 $\text{rand}()$ は区間 $[0, 1]$ における一様分布から取得する乱数、 $\text{randn}()$ は標準正規分布に従う乱数とする。

$$x_p^t = x_p^{t-1} + d_m \text{rand}() \cos(\theta_p^{t-1}) \quad (9)$$

$$y_p^t = y_p^{t-1} + d_m \text{rand}() \sin(\theta_p^{t-1}) \quad (10)$$

$$\theta_p^t = (\theta_p^{t-1} + 20 \text{randn}()) \bmod 360 \text{ [degree]} \quad (11)$$

パーティクルの移動後は、3.4.1 項で生成した尤度マップを用いて各パーティクルに尤度を割り振る。あるパーティクルが持つ尤度 l_p^t は、そのパーティクルが所属するセルから取得する。最後に等間隔リサンプル [23] を用いて個数 N_p を保ちつつ尤度の低いパーティクルを破棄する。最終的にパーティクルフィルタが出力する推定位置 (x_{user}^t, y_{user}^t) は、等間隔リサンプル後のパーティクル位置の加重平均として式 (12) と (13) で表される。

$$x_{user}^t = \frac{\sum l_p^t x_p}{\sum l_p^t} \quad (12)$$

$$y_{user}^t = \frac{\sum l_p^t y_p}{\sum l_p^t} \quad (13)$$

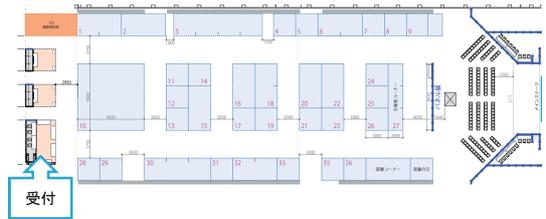


図 8 G 空間 EXPO 2016 における位置推定の対象エリア
Fig. 8 Target area of location estimation at G-EXPO 2016.

表 1 G 空間 EXPO 2016 における実験で利用した機材
Table 1 Equipments for the experiment at G-EXPO 2016.

種別	型番・品名	数量
BLE タグ	uCXpresso LilyPad	3 個
	for nano51822	×30 セット
タンデム	Raspberry Pi 3	
BLE スキャナ	Model B	11 個
通常の BLE スキャナ	Raspberry Pi	
	Model B	27 個
UWB タグ	Ubisense RTLS [24]	30 個

また、ここまでで定義したパラメータ (3.4.1 項におけるスライド窓の窓幅 w 、受信信号強度-距離関数の減衰定数 n_{att} 、推定距離の誤差の表現に利用する正規分布の標準偏差 σ および本項におけるパーティクルの最大移動距離 d_m) に設定する値については、4.4.2 項で述べる。

4. G 空間 EXPO での実験と精度評価

本章では、提案手法の評価のため行った実際の大規模展示会におけるデータ収集実験について述べ、収集したデータに対する基礎分析と 3.4 節の推定アルゴリズムで利用する各種のパラメータの調整を行う。その後、テスト用のデータについて提案手法で位置推定を行い、精度を検証する。精度の検証では、使用する機材の設定を変更した際の精度の変化についても検討する。

G 空間 EXPO 2016 は日本科学未来館で 2016 年 11 月 24 日から 26 日までの 3 日間開催され、のべ 19,138 名が訪れた。我々は来場者に実験への参加を呼びかけ、のべ 260 名（関係者のべ 19 名を含む）が実験に参加した。今回、位置推定の対象とした範囲は展示ブースのある中央エリアで、横約 70 メートル × 縦約 23 メートルの広さである。この範囲を図 8 に示す。被験者は図に示した受付の位置で実験用の機材を装着し、その後会場内を時間制限なしに自由に閲覧し、会場を離れる際に受付に機材を返却した。

4.1 利用機材

実験で利用した機材を表 1 に示す。また、実験中の被験者の様子を図 9 に示す。今回の実験では位置推定時の正解データをより正確に取得するため、UWB タグによる高精度測位で被験者の位置トラッキングを行った。UWB タグは障害物に弱いバイザに乗せる形で頭に装着した。



図 9 BLE タグ・UWB タグを装着した被験者
Fig. 9 Experiment subject wearing BLE beacon tags and a UWB tag.

表 2 BLE タグの設定

Table 2 Settings of BLE beacon tag.

	BLE パケット送信周期	送信パワー
設定 1	0.1 秒 (10 Hz)	-59 dBm
設定 2	0.1 秒 (10 Hz)	-63 dBm
設定 3	0.25 秒 (4 Hz)	-59 dBm

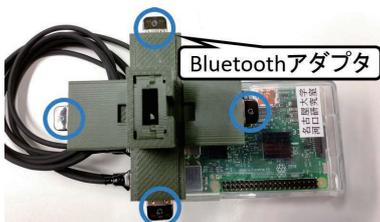


図 10 タンデム BLE スキャナ
Fig. 10 Tandem BLE scanner with 4 Bluetooth adapters in a cross-shaped arrangement.

BLE タグはネームホルダに入れ首から下げるようにした。BLE タグは設定の異なる 3 個を 1 セットとして使用したため、この設定を表 2 に示す。

BLE タグはいずれも iBeacon 形式の BLE パケットを送信する設定とした。送信パワー T_x の -59 dBm は iBeacon のデフォルト設定である。環境に設置した BLE スキャナの詳細については 4.2 節に示す。

4.2 BLE スキャナの設置

この実験で使ったタンデム BLE スキャナは図 10 に示すような外見をしている。各 BLE スキャナは図 11 に示すようにパーティション上部に設置した。会場内における各 BLE スキャナの設置場所を図 12 に番号付きの四角で示す。タンデム BLE スキャナは図 12 のうち 1 から 11 までである。このうち 1 から 10 は本体の USB ポートに直接 USB 延長ケーブルを挿入し、Bluetooth アダプタを十字形



図 11 設置場所の例
Fig. 11 Placement of BLE scanner.

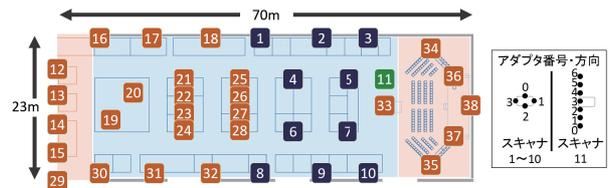


図 12 会場内の BLE スキャナ配置
Fig. 12 Locations of BLE scanners in the area.

に設置できる、3D プリンタで製作した器具を用いて 4 個の Bluetooth アダプタを利用する設定とした。この 10 台で共通する構成をとった理由は 2 つあり、(1) Bluetooth アダプタには番号が自動で割り振られ、変更にはスキャナ固有の設定を生成する必要があるため、(2) 各タンデム BLE スキャナ間の Bluetooth アダプタ配置の差異を減らし、アダプタ番号ごとに同じ方向に設置して配置を簡単にし、またデータ処理の際比較を容易にするためである。タンデム BLE スキャナ 11 は図 4 に示したプロトタイプの流れで、並列に 7 個の Bluetooth アダプタを備える。

タンデム BLE スキャナの Bluetooth アダプタには図 12 の右側枠内に示すような番号が割り振られるよう構成し、会場内での方向もそのとおりとした。12 番以降の BLE スキャナは 1 台に 1 つの Bluetooth アダプタを備えるもの (ノーマル) で、図 3 と同等の外見である。タンデム・ノーマルにかかわらず BLE スキャナに利用した Bluetooth アダプタは ELECOM 社 LBT-UAN05C2、IO DATA 社 USB-BT40LE、PLANEX 社 BT-Micro4 およびサンワサプライ社 MM-BTUD44 を使用した。

4.3 BLE パケット受信状況の基礎分析

本節では、G 空間 EXPO2016 で収集した BLE パケットのデータについて、実環境において、(1) タンデム BLE スキャナによる BLE パケットのペケットロスの低減効果、(2) 会場内各所における受信信号強度の 2 点を検討する。G 空間 EXPO2016 での実験では UWB タグを用いて被験者の位置を高精度に取得していたため、任意の被験者のある時刻の BLE パケットとその送信位置を結び付けられる。したがって、人が多数歩いており、障害物も多い実環境におけるペケットロス状況や電波の減衰を調査できる。

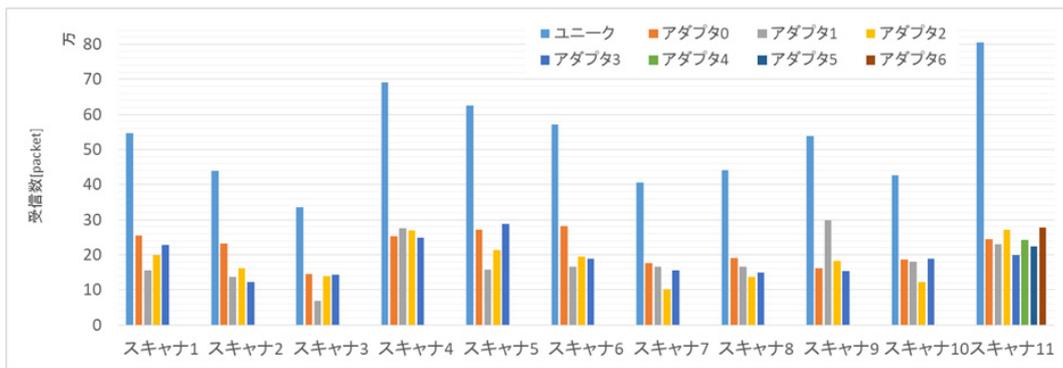


図 13 Bluetooth アダプタごとおよびユニークな BLE パケットの受信数

Fig. 13 The number of received advertising packets, count by each Bluetooth adapter and unique count.

4.3.1 パケットロス低減効果の検証

タンデム BLE スキャナを利用してパケットロスが減少したかを確認するには、タンデム BLE スキャナの各アダプタでの BLE パケット受信数と、各アダプタでの受信 BLE パケットから重複を排除したユニークな BLE パケット受信数を比較すればよい。BLE タグのうち、10 Hz で BLE パケットを送信する設定のものについて、受信時刻が 0.1 秒の位まで一致する BLE パケットを同一 BLE パケットと見なしてユニークな BLE パケットの受信数を計算し、図 13 にまとめた。

図 13 を見ると、ユニークな BLE パケット受信数は各アダプタでの受信数を上回り、2 倍程度に受信数が向上した。また、BLE スキャナにより最大の受信数を記録したアダプタ番号が異なっている。スキャナ 1, 2, 3 で最大のパケット受信数を記録しているアダプタ 0 は会場の壁に面していた。これは、会場の壁で反射した BLE パケットを記録したと考えられるが、スキャナ 8, 9, 10 では壁に面していたアダプタ 2 で最大の受信数は記録していない。すべての Bluetooth アダプタが同じ方向を向いていたスキャナ 11 においても各アダプタ間の受信数の差が存在する。

4.3.2 受信信号強度の最大値、平均値

会場を 1 メートル単位のセルで区切り、セルに割り当てた被験者位置と BLE パケットを結び付け、各 BLE スキャナによりどれくらいの受信信号強度で観測されたかを調べる。また、この結果から位置推定で利用する受信信号強度を選び出す式 (1) における関数 f として適切なものを検討する。各セルで送信された BLE パケットの受信信号強度の最大値、平均値をヒートマップとしてプロットした。タンデム BLE スキャナの場合は、すべての Bluetooth アダプタで得た BLE パケットを利用して最大値、平均値を計算した。タンデム BLE スキャナ 6 の例を図 14 に示す。

各図において緑色の星印はタンデム BLE スキャナ 6 の位置を示す。図 14(a) と図 14(b) ではセルの色は受信信号強度に対応し、-55 dBm から -95 dBm の範囲で描画し

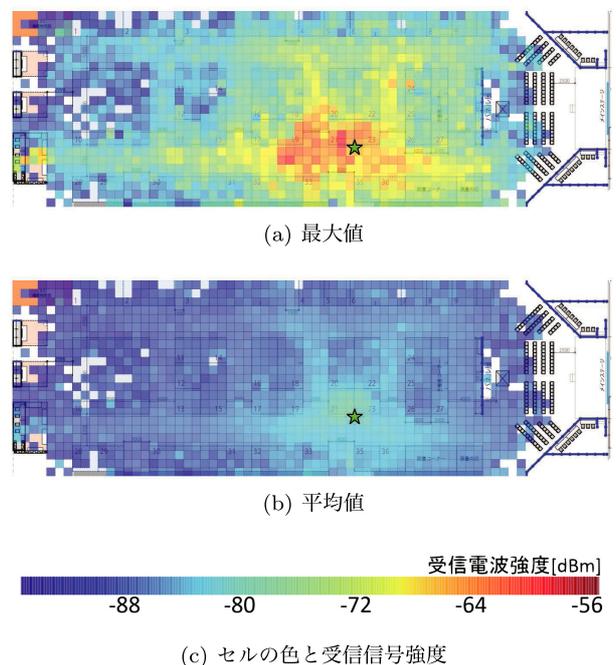


図 14 タンデム BLE スキャナ 6 の受信信号強度分布

Fig. 14 Distribution of signal strength of the packets received by tandem BLE scanner 6.

た。受信信号強度とセルの色の関係については図 14(c) に示す。色がついていないセルは、その地点で送信された BLE パケットが 1 つも受信されなかったことを示す。

図 14(a) を見ると、受信信号強度は BLE スキャナ周辺で強い値を記録しており、離れるにつれて弱くなる。しかし、BLE スキャナ位置を中心とした放射状の分布とはなっておらず、通路に沿って分布している。これは、ブースの壁が受信信号強度に影響を及ぼしたためであると考えられる。図 14(b) を見ると、受信信号強度の平均値は会場のほぼ全域で大きな差がなく、位置推定での利用は難しいと思われる。

また、図 15 にスキャナ 12, 20, 28, 29 およびタンデム BLE スキャナ 3, 10 の受信信号強度の最大値の分布を示す。すべて -55 dBm から -95 dBm で描画し、受信強

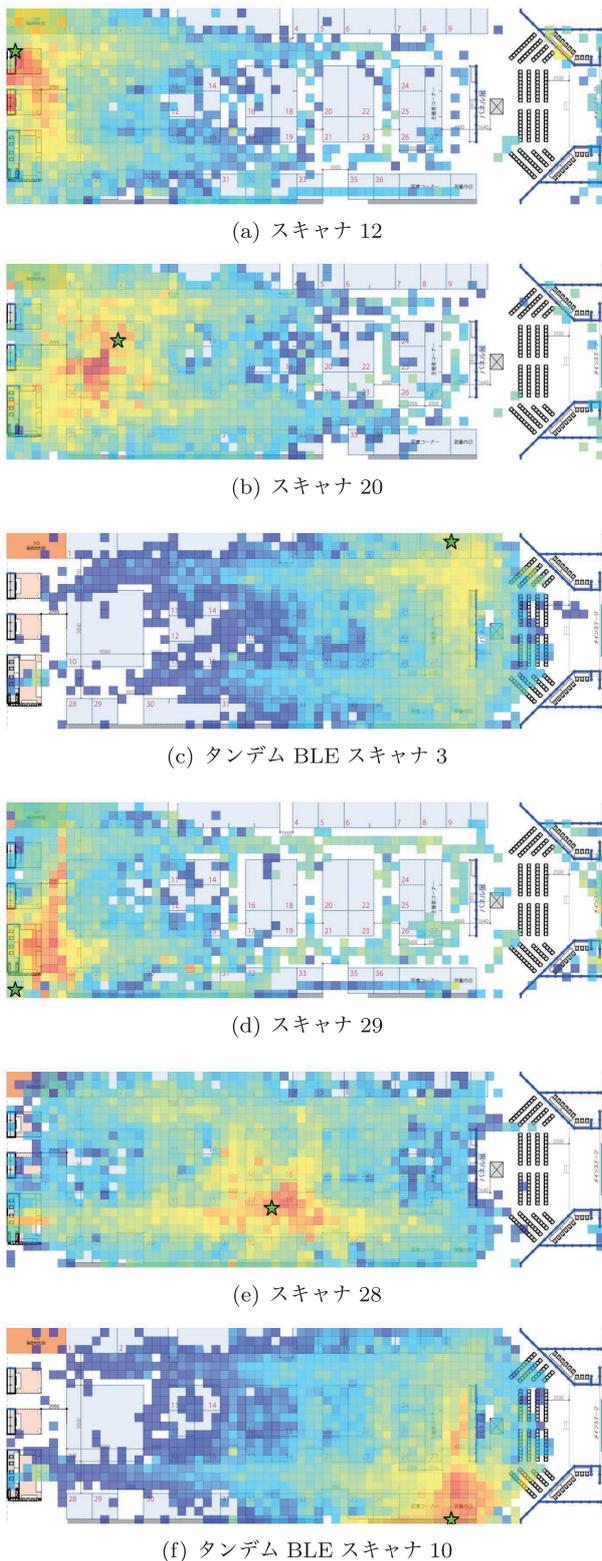


図 15 BLE スキャナごとの受信信号強度分布の違い (最大値)
Fig. 15 Difference of distribution of maximum signal strength for different BLE scanners.

度と色の対応は図 14(c) に示したものと同一である。BLE スキャナの位置は緑色の星印で示す。BLE スキャナの位置に応じてそれぞれ異なる分布ができており、受信信号強度の最大値であれば位置推定に利用できると考えられる。

また、どの BLE スキャナについても通路に沿った分布となっている。特にスキャナ 12 とスキャナ 29 では強い受信信号強度が図の上下方向に現れており、壁などで遮られなかっただけでなく人通りが多かったためだと考えられる。以上より、式 (1) における受信信号強度の抽出では、最大値を出力する関数 \max を利用する。

4.4 精度評価

本節では G 空間 EXPO2016 における実験の収集データを用い、提案手法による推定精度の評価を行う。また、BLE タグの設定や、BLE スキャナの設定を変更した際の精度も検証する。

4.4.1 位置推定に利用した経路

精度の検証用に、3 名の被験者が特定の経路を歩行した。経路は図 16 に示す 4 種類である。図上の各点は UWB タグによって計測された位置情報で、色は青から緑に向かって歩行開始から終了までを示す。歩行開始・終了位置は実験受付の位置で、歩行開始時の方向を矢印で示す。図 16(a) および図 16(c) は会場内を単純に一周するのみであるため、簡単な経路であるといえる。図 16(b) では被験者が会場中心部の展示ブース島を回っており、難易度が上がっているといえ、さらに図 16(d) では会場内の曲がり角ごとに被験者が曲がるため、経路長も伸びている。提案手法では 1 つ前のタイムステップの推定位置をもとに次のタイムステップの位置を推定するため、長い経路では継続的な位置推定の途中でトラッキングに失敗しやすくなっていると考えられ、難易度はこの 4 経路の中で最も難しい。

4.4.2 パラメータの最適化

推定精度の評価のために、以下に示すパーティクルフィルタのパラメータについて全組合せを用いて位置推定を行い、精度が高い組合せを調べた。パーティクルの最大移動速度 1.2 メートル毎秒と受信信号強度-距離関数の減衰定数 1.906 は過去に提案した位置推定手法 [22] での値である。

- スライド窓の窓幅 w : 1, 3, 5, 10 (秒)
- 受信信号強度-距離関数の減衰定数 n_{att} : 1.906, 2.0, 3.0, 4.0
- 距離の誤差として利用する正規分布の標準偏差 σ : 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 (m)
- パーティクルのタイムステップごとの最大移動距離 d_m : 1.0, 1.2, 2.0, 3.0, 4.0 (m/s)

パーティクルフィルタそのもののパラメータを検討するため、BLE タグの設定は 3 種類すべてを用い、BLE スキャナについては会場に設置した 38 台すべてのデータを利用した。精度は 1 秒ごとのユークリッド距離での誤差で評価し、正解データとして被験者が身につけていた高精度測位用の UWB タグのデータを利用した。利用した経路は前節に示した 4 経路である。全組合せの評価の結果、全経路での平均の誤差が最も小さいパラメータのセットは

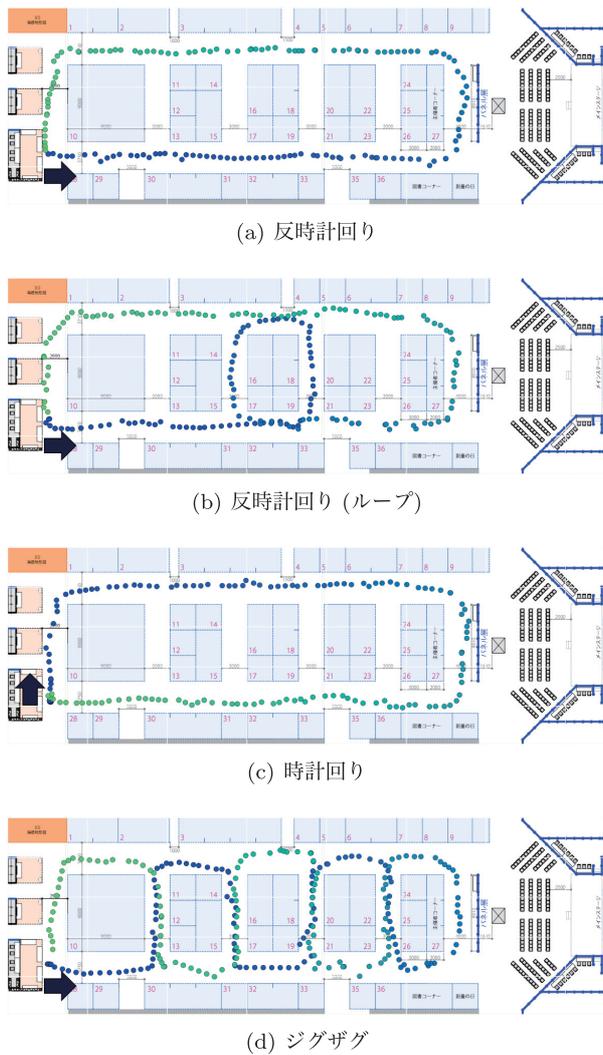


図 16 精度検証用の経路
Fig. 16 Path for evaluation.

$(w, d_m, n_{att}, \sigma) = (3, 4.0, 2.0, 4.0)$ だった。以降の位置推定ではこれを利用する。

また、尤度マップの1セルの大きさ d_{cell} とパーティクルフィルタのパーティクル数 N_p は、計算時間、メモリ量の制限を考慮してそれぞれ $d_{cell} = 1$ [m] および $N_p = 200$ で固定とした。これは、過去に提案した位置推定手法 [22] と同じ値である。以降の推定でも同様の値を利用する。

4.4.3 最良の設定での軌跡

推定によって、どれくらい元の経路を再現できているかの確認のため、図 17 に各経路において最も良い精度を記録した被験者の軌跡を示す。このときのパーティクルフィルタのパラメータ $(w, d_m, n_{att}, \sigma)$ は前項に示したもので、BLE タグは BLE パケット送信周期 0.1 秒 (10Hz) で送信パワー -59 dBm の設定を用い、会場内すべての BLE スキャナを利用した。いずれの軌跡でも、歩行開始から終了に向かって青色から緑色に変化する点で UWB タグによって計測された位置情報を示し、同様に歩行開始から終了に向かって紫色から黄色に変化する点で推定された位置

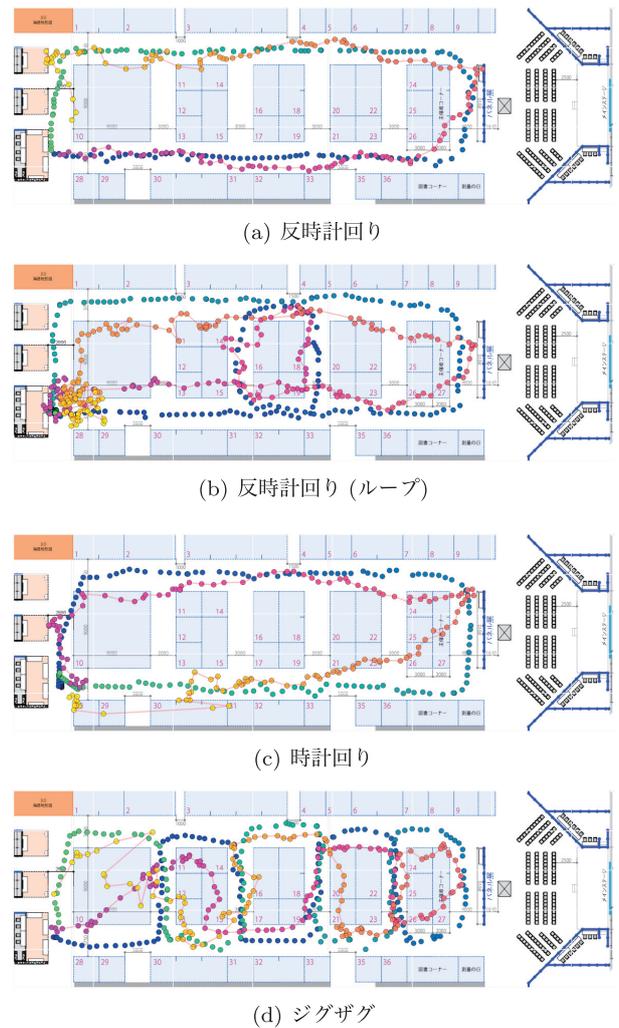


図 17 各経路において精度が最も良い軌跡
Fig. 17 Paths with best accuracy.

を示している。また、表 3 に、通常の BLE スキャナを設置していた会場の左半分と、主にタンデム BLE スキャナを設置していた右半分での各経路の精度を示す。

図 17(a) では左上を除き経路を復元できている。図 17(c) では右下の角でショートカットするように推定点が移動しており、うまく復元できていない。また、左下に点が飛んで動いている箇所がある。表 3 では右下の角の部分の影響で右半分の精度が悪くなっている。図 17(b) ではおおむね経路を復元できているものの、全体に中央部に寄った形状で復元されている。図 17(d) では概形をおおそ復元できているものの、会場内左側ではうまく推定できていない。これらの傾向は前項で検討したパラメータにおいて精度の比較的良好のものに共通して現れており、会場の特性や機材の配置など、パラメータで変化しない要素の影響だと考えられる。

表 3 を見ると、どの経路でもタンデム BLE スキャナの有・無 (会場の右側・左側) にかかわらず、時計回りを除いては左右ではほぼ同じ精度を達成した。標準偏差では右半分のほうが良い値を出す傾向にあるが、大きな差はなかった。

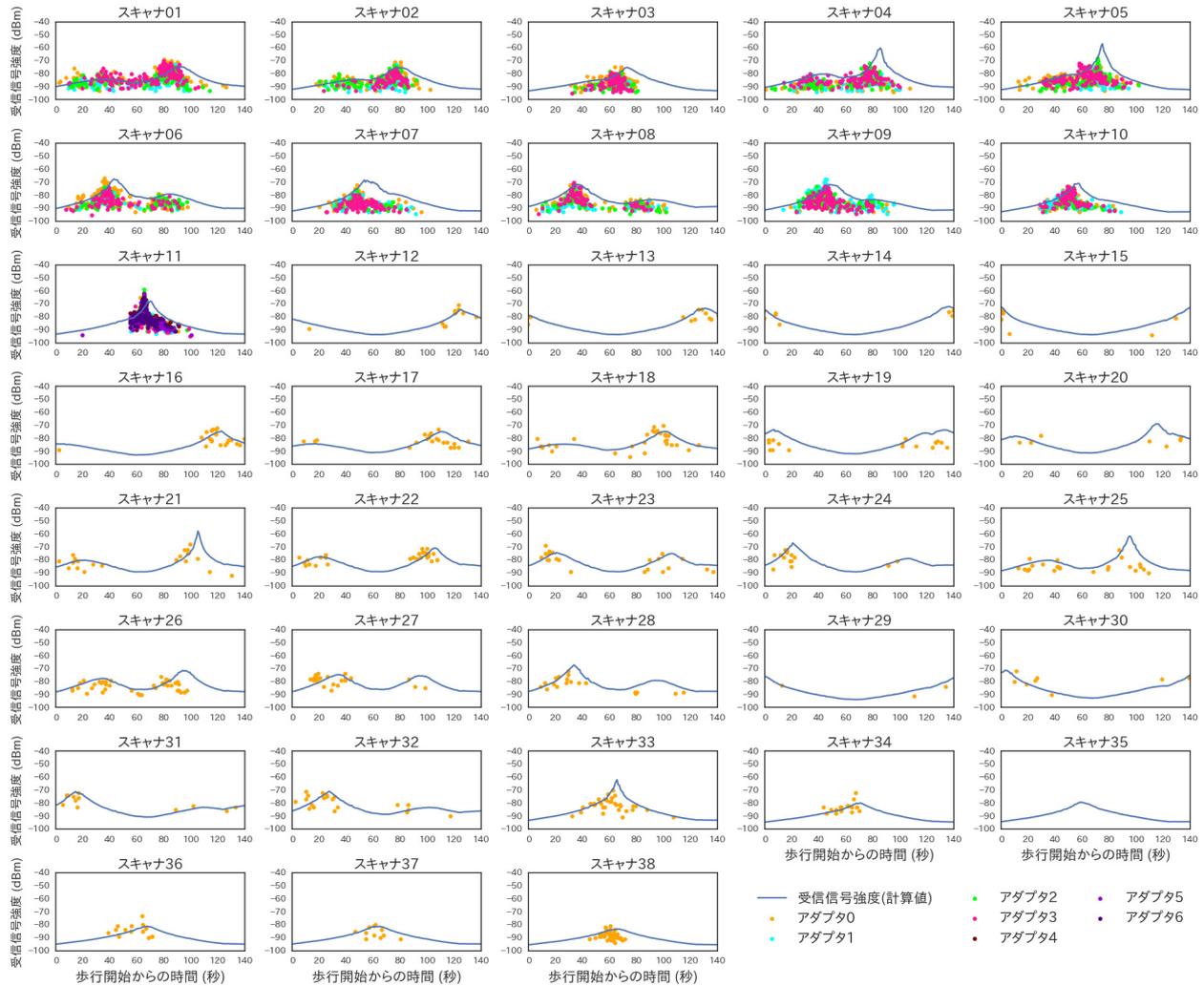


図 18 反時計回りに歩いた被験者における、正解位置から計算した受信信号強度と実際に観測された受信信号強度

Fig. 18 Signal strength comparison: calculated value from ground truth and real value, for the subject walked counterclockwise.

表 3 図 17 の各経路における会場内左半分・右半分での精度
Table 3 Estimation accuracy focusing on left half and right half at Fig. 17.

左半分		
経路	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)
反時計回り	2.02	1.18
反時計回り (ループ)	3.47	1.45
時計回り	2.90	1.95
ジグザグ	3.02	1.48
右半分		
経路	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)
反時計回り	2.18	1.12
反時計回り (ループ)	3.27	1.18
時計回り	4.09	2.11
ジグザグ	3.41	1.09

反時計回りに歩いた被験者について、正解位置から各スカナまでの距離を求め、式 (3) に代入して計算した受信信号強度と、実際に受信した BLE パケットの受信信号強度を図 18 に示す。青色の線が計算による値で、点が実際の受信信号強度を示す。点の色は Bluetooth アダプタの番号に対応し、通常の BLE スキャナでは複数の Bluetooth アダプタを持たないため、アダプタ 0 のみとなっている。タンデム BLE スキャナであるスカナ 1 から 11 では各 Bluetooth アダプタにより歩行中比較的長い時間にわたって多数の packets がとらえられている一方で、その他の番号の BLE スキャナでは計算値が高い (=被験者が BLE スキャナに接近している) ときのみまばらに受信する傾向が分かる。タンデム BLE スキャナの利用により多数の BLE パケットをとらえられ、より望ましい受信信号強度を抽出しやすくなる。

4.4.4 BLE タグの設定による精度変化

表 2 で示したとおり、今回の実験では被験者が設定の異

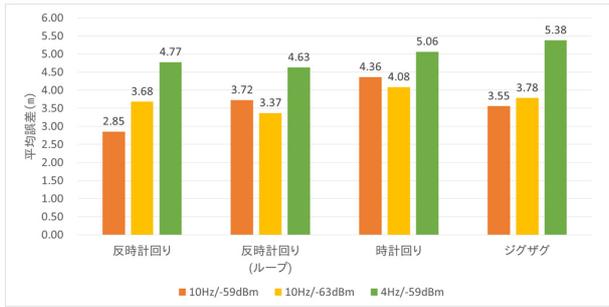


図 19 BLE タグの設定による平均誤差の変化

Fig. 19 Average estimation error by settings of BLE beacon tag.

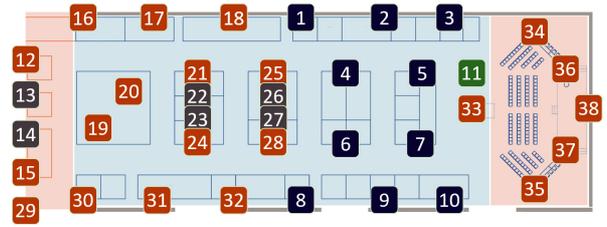
なる 3 つの BLE タグを同時に携帯したため、BLE パケット送信周期と送信パワーによる精度への変化があるかを検証する。パーティクルフィルタのパラメータは 4.4.2 項で得た $(w, d_m, n_{att}, \sigma) = (3, 4.0, 2.0, 4.0)$ である。各経路での 3 名の被験者の平均誤差を図 19 に示す。いずれの経路でも、BLE パケット送信周期が 0.25 秒 (4 Hz) で送信パワーが -59 dBm の BLE タグを使った場合は平均誤差が大きく、精度が悪い。一方、BLE パケット送信周期が 0.1 秒 (10 Hz) の場合は経路によって精度が良い送信パワーが異なる。したがって、送信パワー 4 dBm の差は精度に大きな影響を与えず、主に BLE パケット送信周期が精度に影響を与えると考えられる。

4.4.5 利用する BLE スキャナ台数による精度変化

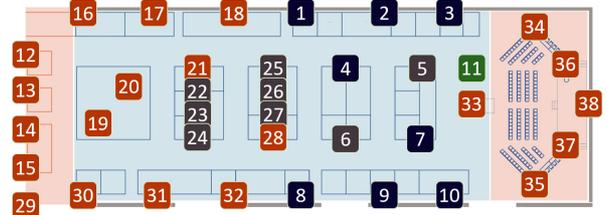
会場内の BLE スキャナ配置は図 12 に示したとおりであるが、スキャナ 12 から 15 および 21 から 28 は利用する BLE スキャナの台数により精度にどのような変化が起きるかを検証するため、高密度に設置した。そこで、会場右側と同じ程度の密度となるよう会場左側の一部の BLE スキャナを利用しないで位置推定を行った。また、中心部の島の BLE スキャナが 1 つずつになるように利用する BLE スキャナを制限した場合も検証した。パーティクルフィルタのパラメータは 4.4.2 項で得た $(w, d_m, n_{att}, \sigma) = (3, 4.0, 2.0, 4.0)$ である。各設定で利用されない BLE スキャナを図 20 にグレーアウトさせて示す。結果は図 21 に示す。いずれの経路においても、台数の制限で多少変化が見られるものの、大きな精度の変化は生じなかった。したがって、より少ない BLE スキャナ台数でも位置推定を行え、位置推定システムを低価格にできると考えられる。

4.4.6 タンデム BLE スキャナの Bluetooth アダプタ台数による精度変化

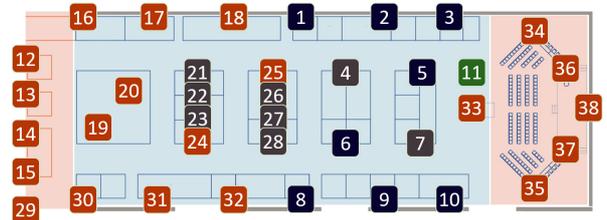
タンデム BLE スキャナは 1 台に複数個の Bluetooth アダプタを備えるため、利用するアダプタを制限した際の精度を検証する。パーティクルフィルタのパラメータは 4.4.2 項で得た $(w, d_m, n_{att}, \sigma) = (3, 4.0, 2.0, 4.0)$ である。タンデム BLE スキャナ 1 から 11 のアダプタ 0, 1, 2, 3 から得られる 15 通りの組合せについて、パケット送信周



(a) 左側の密度を調整



(b) 島に 1 つのみ (i)



(c) 島に 1 つのみ (ii)

図 20 一部の BLE スキャナを利用しない設定

Fig. 20 Reducing the number of BLE scanners.

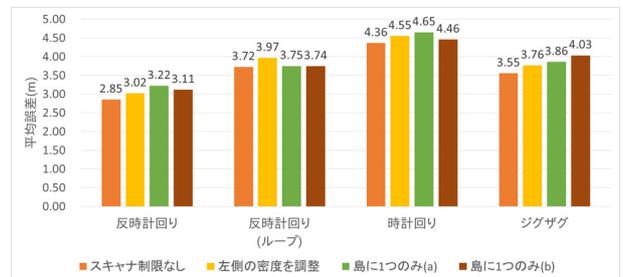


図 21 一部の BLE スキャナを利用しない場合の平均誤差の変化
Fig. 21 Average estimation error by reduction of the numbers of BLE scanners.

期が 0.1 秒 (10 Hz) の BLE タグを用いて位置推定を行った。なお、アダプタを 1 つしか持たないノーマルの BLE スキャナはつねに有効とし、タンデム BLE スキャナ 11 についてはアダプタ 4, 5, 6 をつねに無効とした。結果を平均誤差が小さい順にソートして表 4 に示す。

表より、最も良い精度を達成できるのはタンデム BLE スキャナのすべてのアダプタを利用した場合で、平均誤差 3.62 メートルであった。また、この値が全体を通して最良の精度となる。全体として複数のアダプタを使う場合が高い精度となっており、アダプタを単体で使う場合はすべて下位となった。アダプタを単体で使う場合で、アダプタ 0 の場合のみ 3 メートル台の精度を保っている理由として

表 4 タンデム BLE スキャナの利用 Bluetooth アダプタによる精度の変化

Table 4 Average estimation error and standard deviation by available Bluetooth adapters of tandem BLE scanners.

利用アダプタ	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)
0, 1, 2, 3	3.62	1.75
0, 1, 2	3.64	1.87
0, 2, 3	3.65	1.77
1, 2, 3	3.65	1.88
0, 2	3.69	1.82
2, 3	3.69	1.92
0, 3	3.70	1.88
0, 1, 3	3.71	1.87
1, 3	3.74	1.93
0	3.78	1.87
0, 1	3.81	1.92
1, 2	4.02	2.07
3	4.13	2.15
2	4.21	2.20
1	4.58	2.41

表 5 Bluetooth アダプタごとのタンデム BLE スキャナ 1 台あたりの平均パケット受信数

Table 5 Average amount of received packets per Bluetooth adapters of tandem scanners.

アダプタ	受信数
0	217,916
1	181,701
2	181,490
3	188,159

は、アダプタ 0 での受信数が多く、より多くのパケットを用いて推定ができたためだと考えられる。実際の各アダプタでのパケット受信数の平均値は表 5 に示すとおりで、アダプタ 0 が多い。しかしなぜ受信数が多くなったかについては今後調査が必要である。

4.4.7 議論

4.4.2 項では、最良のパラメータセットが $(w, s, n_{att}, \sigma) = (3, 4.0, 2.0, 4.0)$ だった。スライド窓の窓幅 w が 3 秒だった理由は、位置推定時は窓内での最大の受信信号強度を利用するためだと考えられる。長い窓幅を用いると遠い過去の位置で計測された受信信号強度が利用され、精度が下がると考えられる。また、パーティクルの最大移動速度 s が 4 メートル毎秒となった理由としては、毎秒大きく変化する尤度マップとパーティクルの分布を合わせるためにより広範囲にパーティクルを散布する必要があったためだと考えられる。受信信号強度-距離関数の減衰定数 n_{att} はベースとした位置推定手法と近い値が選ばれた。これは、受信信号強度における 1 dBm の差が大きな距離の差として現れることを意味する。逆に、受信信号強度から算出した距離

d_{est} が含む誤差に対応する σ は大きな値となった。これは、受信信号強度そのものは距離とともに変化するが、実計測においては受信信号強度が不安定で、式 (3) によって求めた d_{est} に大きな誤差を含むためだと考えられる。

また、利用する機材の設定を変更した際の精度の変化を検証したところ、4.4.4 項より BLE タグの BLE パケット送信周期が短いほど、高精度に推定できた。また、4.4.6 項よりタンデム BLE スキャナの利用 Bluetooth アダプタを変更したところ、より多くのパケットを利用可能な、複数の Bluetooth アダプタを用いる設定で良い精度となる傾向となった。したがって、高精度な推定には受信信号強度をより多くサンプリングする必要があると考えられるが、他にも差を生じる原因がないかを検討する必要がある。

また、4.4.5 項より、今回の実験では BLE スキャナの設置台数を減らしても精度への影響が少なかった。より安価に機材を揃えるには、精度に影響を及ぼさない範囲で BLE スキャナの台数を減らすとよいと考えられるが、具体的にどれくらいの面積にどれくらいの台数が必要かについては今後検討する必要がある。

4.4.8 以前提案した手法・他手法との比較

我々は以前にも配布型 BLE タグと固定型スキャナを用いる位置推定手法 [22] を提案している。この際行った実験は G 空間 EXPO 2015 を会場としている。機材の設定や推定アルゴリズムが異なるため、単純な比較はできないが、10 メートルを超える大きな誤差を出していた以前の手法に比べ、今回提案する手法は大きく精度を改善している。

また、Faragher ら [14] の手法では、環境設置の BLE ビーコン・移動型 BLE スキャナのシステム構成で fingerprint を用いており、BLE ビーコンのパケット送信レートや送信パワーでも今回の実験と大きく設定が異なる。環境中の他者について言及がなく、実験設定（歩行の時間・経路）や結果の提示方法も異なるため、単純な比較は行えないが、50 メートル × 15 メートルのオフィス環境で、推定の 95% が 19 個の BLE ビーコンを用いる場合 2.5 メートル、7 個の BLE ビーコンの場合 4.8 メートルに収まる精度を報告している。提案手法は BLE スキャナの台数が 38 台だが fingerprint を利用せずに平均 3.6 メートルの精度を達成しており、少ない事前準備で近い精度を達成できた。

4.4.9 実用に向けての考察

本実験では、38 台の BLE スキャナを会場に設置した。設置時は展示ブースに提供される電源とネットワークを設置位置まで延長する必要が生じたが、4.4.5 項で示したようにより少ない台数でも精度を維持できる可能性があり、今後さらに台数を減らせると労力、金銭コストをより抑えられる。しかし現在の構成でも、設置や撤収に必要なコストの点では、設置時・設置後の位置調整が不要である、fingerprint 作成のような事前計測が不要である、見通し確保や遮蔽物の回避を狙った天井への設置が不要であるなど

複数の利点がある。実際に本実験では正解位置を取得するための UWB タグについては、その親機を天井から吊り下げたため、設置時・回収時に高所作業が生じ、大きな手間となった。

また、BLE タグの配布・回収およびコストについて、今回は被験者への BLE タグの配布時に実験の説明、機材の貸出についての同意確認および、性別や職業などの情報と BLE タグを紐づけるためのアンケート回答も行ったため時間がかかった。その間、受付の人員は他の人への呼びかけを行えなかったため、実用化の際は名刺と引き換えに BLE タグを渡すことで来場者の属性を紐付けつつ、同意確認などを簡略化できると考えられる。配布した BLE タグの回収について、今回の実験では被験者への実験説明時に受付に戻るよう指示をしており、すべての BLE タグを回収できた。実用化の際は「被験者が会場内をどう移動したか、訪問ブースに基づくおすすめブースは何か」などの情報を印刷して配布することで、受付に戻る理由を付与できる。コストについて、今回の実験で用いたタグは異なる設定を試せるようファームウェアを自由に書き換えられ、電池も交換できる 1 枚 4,000 円程度のものを利用した。将来的にはファームウェア変更不可・電池交換不可でより低価格なタグを採用することでコストを抑えられる。また、忘れ物防止タグを流用し、実験終了後はノベルティとして譲渡することで回収不要かつ実験参加へのインセンティブとすることも考えられる。

5. おわりに

本論文では、イベントにおける人流解析で必要となる屋内位置推定手法を提案した。イベントにおける人流解析では、多数の人からデータを集める必要があり、機材価格が安く、機材の配置を変更しても精度変化が少ないなどの条件が求められる。さらに、準備期間が短い展示会において、数メートルおきに多数の機材を設置する、機材設置後に事前計測を行うなどの大きな労力を要する作業は困難である。したがって、事前計測が重要な Wi-Fi fingerprinting のような既存の手法ではイベントにおける利用が困難であると考えられたため、提案手法では BLE を利用した位置推定手法を採用した。

提案手法では、イベント来場者が携行する BLE タグの位置を、会場内に設置した BLE スキャナを用いて推定する。ハードウェア面ではパケットロスを防ぐため、複数のアダプタを 1 台のスキャナに備えるタンデム BLE スキャナを構築した。アルゴリズム面では受信信号強度の不安定さに対処するため、スライド窓や正規分布を用いた尤度マップ生成と、パーティクルフィルタによる前回位置を考慮する推定を行った。また、複数のパラメータを用いてアルゴリズムの挙動を制御できるようにした。

提案手法の精度検証では、実際に G 空間 EXPO2016 で

実験を行って得たデータを用いた。実験では被験者に設定の異なる BLE タグを複数携行させ、正解となる位置情報の取得に UWB タグを利用した。精度を検証したところ、複数のテスト用経路で、タンデム BLE スキャナのすべての Bluetooth アダプタを有効にし、最良のパラメータを利用したところ平均で 3.6 メートルの誤差となった。また、機材の設定が異なる場合は推定精度も変化した。BLE タグのパケット送信周期や送信パワーを変更した場合、送信周期が精度に影響した。タンデム BLE スキャナで利用可能な Bluetooth アダプタの組合せを変更した場合、複数のアダプタが利用可能な設定では 1 つのアダプタしか利用できない場合に比べて良い精度だった。さらに、会場内の BLE スキャナを一部無効にしての推定では、精度の変化が少なく、より少ない台数の BLE スキャナで機材にかかるコストを抑えて位置推定できる可能性が示された。

今後の課題としては、以下があげられる。

- (1) テスト用経路以外の一般来場者の位置推定・精度検証
- (2) G 空間 EXPO 以外の環境における実験
- (3) 精度向上に向けたタンデム BLE スキャナの Bluetooth アダプタの数・方向の検討

(1) 展示会における来場者は会場内を移動する際、途中展示ブースで足を止め、展示物を見てから歩く行動パターンをとり、歩行中も他社との接触回避などで一直線に歩くわけではない。したがって、そのような行動パターンをとる被験者に対しては、推定精度が変化すると考えられるため、調査が必要である。(2) 今回実験を行った環境は日本科学未来館における G 空間 EXPO のみであるが、他の展示会ではブース配置や会場が異なるため、推定精度も変化すると考えられる。また、(1)、(2) とともに窓幅などのパラメータの変更のみで高精度を達成可能であるのか、推定手法そのものをさらに改善すべきかなどの検証が必要である。(3) 今回実験で使用したタンデム BLE スキャナの Bluetooth アダプタ個数や方向は、機材の設置や管理を簡易に行うために単純なものであったが、機材に必要なコストを低く抑えつつ、高精度に位置推定を行うにはこれらを変化させての実験が必要である。

謝辞 本研究の一部は G 空間 EXPO2016 屋内測位 × IoT 実証実験実行委員会の協力、および総務省 SCOPE (受付番号 172106102) の委託を受けたものです。

参考文献

- [1] Komai, K., Fujimoto, M., Arakawa, Y., Suwa, H., Kashimoto, Y. and Yasumoto, K.: Beacon-Based Multi-Person Activity Monitoring System for Day Care Center, *2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, pp.1-6 (2016).
- [2] G 空間 EXPO : G 空間 EXPO 公式サイト, 入手先 (<http://www.g-expo.jp/>).
- [3] Gu, Y., Lo, A. and Niemegeers, I.: A Survey of In-

- door Positioning Systems for Wireless Personal Networks, *Communications Surveys & Tutorials*, Vol.11, No.1, pp.13–32, IEEE (2009).
- [4] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P. and Liu, J.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol.37, No.6, pp.1067–1080 (2007).
- [5] Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. INFOCOM 2000, 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pp.775–784 (2000).
- [6] He, S. and Chan, S.-H.G.: Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol.18, No.1, pp.466–490 (2016).
- [7] Youssef, M.A., Agrawala, A. and Shankar, A.U.: WLAN Location Determination via Clustering and Probability Distributions, *Proc. 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003)*, pp.143–150 (2003).
- [8] 藤田 迪, 梶 克彦, 河口信夫: Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法, *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.3, pp.1069–1081 (2011).
- [9] Ferris, B., Fox, D. and Lawrence, N.: Wi-Fi-SLAM Using Gaussian Process Latent Variable Models, *Proc. 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'07)*, pp.2480–2485 (2007).
- [10] Fet, N., Handte, M. and Marrón, P.J.: Autonomous Signal Source Displacement Detection and Recalibration of Fingerprinting-based Indoor Localization Systems, *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp.1–8 (2017).
- [11] Fet, N., Handte, M. and Marrón, P.J.: A Model for WLAN Signal Attenuation of the Human Body, *Proc. 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '13)*, pp.499–508 (2013).
- [12] Halperin, D., Hu, W., Sheth, A. and Wetherall, D.: Tool Release: Gathering 802.11n Traces with Channel State Information, *SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.41, No.1, p.53 (2011).
- [13] Li, X., Li, S., Zhang, D., Xiong, J., Wang, Y. and Mei, H.: Dynamic-MUSIC: Accurate Device-Free Indoor Localization, *Proc. 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '16)*, pp.196–207 (2016).
- [14] Faragher, R. and Harle, R.: Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.33, No.11, pp.2418–2428 (2015).
- [15] 石塚宏紀, 上坂大輔, 黒川茂莉, 渡邊孝文, 村松茂樹, 小野智弘: BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討—Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有, *研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL)*, Vol.2014, No.21, pp.1–6 (2014).
- [16] Ni, L.M., Liu, Y., Lau, Y.C. and Patil, A.P.: LAND-MARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID, *Proc. 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003)*, pp.407–415 (2003).
- [17] Fontana, R.J.: Recent System Applications of Short-Pulse Ultra-Wideband (UWB) Technology, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol.52, No.9, pp.2087–2104 (2004).
- [18] Harter, A., Hopper, A., Steggle, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Proc. 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, pp.59–68 (1999).
- [19] Fukuju, Y., Minami, M., Morikawa, H. and Aoyama, T.: DOLPHIN: An Autonomous Indoor Positioning System in Ubiquitous Computing Environment, *Proc. IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems, WSTFES 2003*, pp.53–56 (2003).
- [20] Zhao, H. and Shibasaki, R.: A Novel System for Tracking Pedestrians Using Multiple Single-Row Laser-Range Scanners, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol.35, No.2, pp.283–291 (2005).
- [21] Ban, R., Kaji, K., Hiroi, K. and Kawaguchi, N.: Indoor Positioning Method Integrating Pedestrian Dead Reckoning with Magnetic Field and WiFi Fingerprints, *2015 8th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp.167–172 (2015).
- [22] Urano, K., Hiroi, K., Kaji, K. and Kawaguchi, N.: A Location Estimation Method using BLE Tags Distributed Among Participants of a Large-Scale Exhibition, *International Workshop on Mobile Ubiquitous Systems, Infrastructures, Communications, And Applications (MUSICAL 2016)*, pp.119–124 (2016).
- [23] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D.: *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*, The MIT Press (2005).
- [24] Ubisense: Ubisense RTLS, available from (<http://ubisense.net/en>).



浦野 健太 (学生会員)

2016年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。2018年同大学大学院修士課程修了。IoT機器を用いた屋内位置推定に関する研究に従事。



廣井 慧 (正会員)

2004年東北大学工学部電子工学専攻卒業。同年東日本電信電話株式会社入社。2011年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科修士課程修了。2014年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士(メディアデザイン学)。同年名古屋大学未来社会創造機構特任助教を経て、2018年から同大学工学研究科助教。災害情報通信、センサネットワークの研究に従事。



梶 克彦 (正会員)

2002年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士課程修了。博士(情報科学)。NTTコミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイト、名古屋大学大学院工学研究科助教を経て、2015年より愛知工業大学情報科学部准教授。日本ソフトウェア科学会会員。屋内位置推定、遠隔コミュニケーション支援の研究に従事。



河口 信夫 (正会員)

1990年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。1995年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程満了。同年同大学工学部助手。同大学講師、准教授を経て、2009年より同大学大学院工学研究科教授。NPO位置情報サービス研究機構 Lisra 代表理事。モバイルコミュニケーション、ユビキタスコンピューティング、行動センシングの研究に従事。博士(工学)。ACM, IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本音響学会各会員。