

# タンデムスキャナを用いた配布型 BLE タグ位置推定手法

浦野 健太<sup>1,4</sup> 廣井 慧<sup>2,4</sup> 梶 克彦<sup>3,4</sup> 河口 信夫<sup>1,2,4</sup>

概要：我々は大規模展示会における来場者の動向（ブースの訪問順や滞在時間など）を調査するために、配布型 Bluetooth Low Energy (BLE) タグと固定型のスキャナを用いる屋内位置推定を検討してきた。配布型 BLE タグを用いることで大規模なデータ収集を容易に行える、スマートフォン用アプリケーションが不要になるなどの効果が期待できる。G 空間 EXPO2015 での実験データを用いて位置推定を行ったところ、パケットロスが原因とみられる誤差が生じた。そこで、ひとつのスキャナが複数の Bluetooth アダプタを備えるタンデムスキャナを構築しパケットロスを減らす取り組みをしてきた。本研究では、タンデムスキャナを用いて行った G 空間 EXPO2016 での実験データを用いて位置推定を行った。三点測位とパーティクルフィルタを用いた位置推定手法のパラメータ最適化とタンデムスキャナの利用により、平均 4.51m の精度を達成した。また、BLE タグの広告周期が長い場合精度が下がり、タンデムスキャナの利用 Bluetooth アダプタを変更すると精度も変化することがわかった。

## A Location Estimation Method using Mobile BLE Tags with Tandem Scanners

KENTA URANO<sup>1,4</sup> KEI HIROI<sup>2,4</sup> KATSUHIKO KAJI<sup>3,4</sup> NOBUO KAWAGUCHI<sup>1,2,4</sup>

### 1. はじめに

展示会、即売会、博覧会などのイベントにおける人流解析は重要である。人気の展示や移動経路など、来場者の動向を把握することで、展示ブースの配置の最適化や、展示内容の調整を行えると考えられる。人流解析を行うには来場者の位置を把握する必要がある。屋内で開催されるイベントにおいては、屋外で一般に利用される GPS 信号が微弱となり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。

様々な屋内位置推定手法が提案されているが、「多数の人からのデータ収集が容易である」「機材が比較的安価」「機材設置場所の自由度が高い」など、イベントで位置推定を行う際に必要な条件を満たせる技術として、我々は Bluetooth Low Energy (BLE) 技術に着目し、屋内位置推定を試みてきた。一般的な BLE 位置推定のデザインでは、環境固定の BLE ビーコンからの電波をスマートフォンで

観測するが、我々はより安価、手軽に位置推定を提供できるデザインとして、来場者に配る配布型 BLE タグと環境固定型のスキャナを用いて屋内位置推定を行ってきた。日本科学未来館で行われた展示会、G 空間 EXPO2015 におけるデータ収集実験では 3 日間でのべ 185 名に BLE タグを装着して会場を自由に移動してもらい、位置推定を行った [1]。この実験では受信電波強度から距離を算出し三点測位とパーティクルフィルタで位置推定を行ったが、10m から 30m の大きな誤差を生じていた。誤差の原因としてパケットロスが頻発し、単位時間あたりに得られるデータ量が位置推定を行うのに不十分だったと考えられたため、パケットロスの低減を狙い複数の Bluetooth アダプタを 1 台のスキャナに取り付けたタンデムスキャナを構築し、実際にパケットロスの低減を確認した [2]。

本研究では、タンデムスキャナと複数の設定の BLE タグを用いて行った G 空間 EXPO2016 での実験データから位置推定を行う。G 空間 EXPO2016 での実験では、3 日間でのべ 260 名からデータを収集した。収集したデータのうち、3 名の被験者が歩いた 4 つの経路について、三点測位とパーティクルフィルタを組み合わせた手法 [1] を改善

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院 工学研究科

<sup>2</sup> 名古屋大学 未来社会創造機構

<sup>3</sup> 愛知工業大学 情報科学部

<sup>4</sup> NPO 法人位置情報サービス研究機構 (Lisra)

して位置推定を行った。パーティクルフィルタについて推定に利用する窓幅やパーティクルの移動速度などのパラメータの最適化を行い、最も良い精度を出せるパラメータを用い、BLE タグやタンデムスキャナの設定を変更した場合の精度を検証した。BLE タグについては広告周期が長いと精度が下がり、タンデムスキャナについては利用する Bluetooth アダプタにより精度が異なった。最終的な精度は平均 4.51m, 標準偏差 2.44m となった。

本稿の構成は次のとおりである。2 章では関連する屋内位置推定手法を紹介する。3 章では G 空間 EXPO2016 で行った実験の詳細を述べ、4 章で受信電波強度について基礎的な分析を行う。5 章では位置推定に利用する三点測位とパーティクルフィルタを用いた手法のパラメータ調整について述べる。6 章では BLE タグの設定やタンデムスキャナの利用 Bluetooth アダプタなどの設定を変更した際の精度への影響を述べる。最後に 7 章で全体のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 関連研究

屋内位置推定手法としては、スマートフォンなど個人所有のデバイスを利用するものや、環境設置の計測インフラを利用するものなど、様々なものが提案されている。スマートフォンのみを利用する手法として、端末が内蔵する加速度センサ・ジャイロセンサなどを用いて歩行や方向転換を検出し、スタート位置からの相対的な位置を推定する歩行者自律航法 (Pedestrian Dead Reckoning; PDR)[3] が提案されているが、センサ誤差の蓄積が課題となっている。また、スマートフォンに加えてインフラを利用する方法としては環境に設置されている Wi-Fi アクセスポイントからの電波強度を利用する方法 [4], [5] があげられる。一般的に電波強度は建物の構造や障害物に左右されるため、事前計測で作成した電波強度マップと実際の計測を照らし合わせる fingerprinting が利用されている。これらの方法を利用する場合はスマートフォン向けアプリケーションのインストールが必須となり、得られるデータ量がインストール数に左右される。

また、専用の計測機器を環境に設置する方法として、Radio Frequency Identification (RFID) タグや超音波発信機、Ultra Wide-band (UWB) なども利用されている [6], [7]。これらの方法は高精度に位置を計測できる一方で、計測機器が高価であったり、設置場所に制限があるなど、会場内全域で位置推定が利用できるとは限らず、同じ個人を追跡し続けることも困難である。

BLE ビーコンを用いた位置推定は、Wi-Fi を利用する位置推定と類似している。一般的には環境中に BLE ビーコンを設置し、スマートフォンでビーコンの発する電波を計測して位置推定を行う。Faragher ら [9] は Wi-Fi finger-



図 1 BLE タグ・UWB タグを装着した被験者

表 1 実験で利用した機材

種別	型番・品名	数量
BLE タグ	uCXpresso LilyPad for nano51822	30 個 × 3 セット
タンデムスキャナ	Raspberry Pi 3 Model B	11 個
通常のスキャナ	Raspberry Pi Model B	27 個
UWB タグ	Ubisense RTLS[8]	30 個

表 2 BLE タグの設定

	広告周期	送信パワー
設定 1	0.1 秒 (10Hz)	-59dBm
設定 2	0.1 秒 (10Hz)	-63dBm
設定 3	0.25 秒 (4Hz)	-59dBm

printing 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電波強度マップを作成し、50m×15m のオフィス環境で 7 個のビーコンを用いて約 5m の精度を達成したと報告している。しかし、同時に広告周期や送信電波強度により精度が変化することも述べている。駒井ら [10] 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配布型 BLE タグからの電波を環境に固定したスキャナで観測し、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、受信電波強度が最も強いスキャナのあるエリアが推定位置とされた。また、石塚ら [11] 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電波強度の不安定さのために 10m から 20m 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。

本研究で提案する手法は、1) 配布型 BLE タグを人が持ち歩き、2) 環境固定の複数のスキャナからの BLE パケット情報を統合して位置推定を行う。以上の 2 点によりスマートフォンを必要としない、従来の BLE 位置推定より高精度な位置推定を目指す。しかし、展示会等のイベントにおいては、いくつかの要素により位置推定の難易度が上がる。

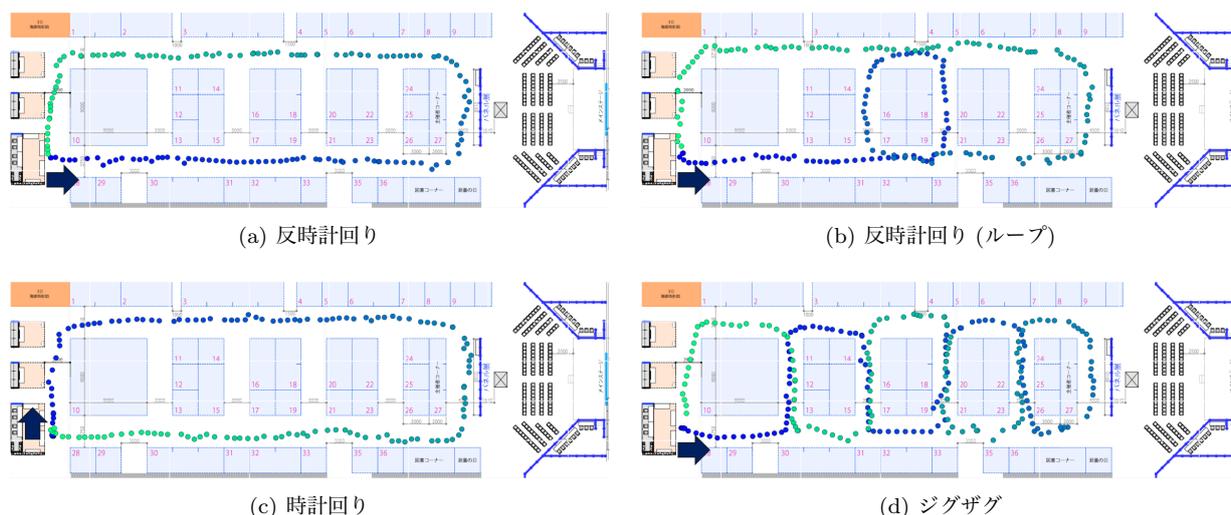


図 2 精度検証用の経路

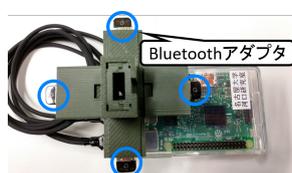


図 3 タンデムスキャナ



図 4 通常のスキャナ

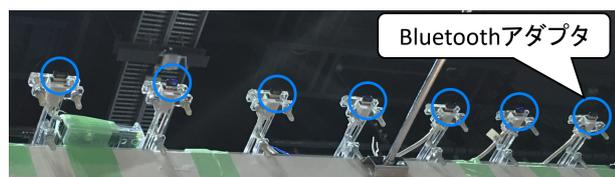


図 5 スキャナ 11 の Bluetooth アダプタ配置

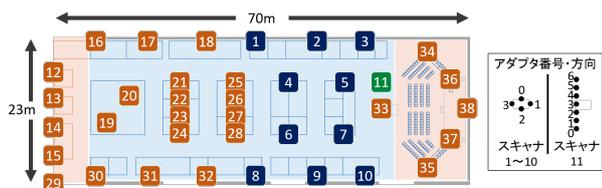


図 6 会場内のスキャナ配置

- (1) 会場が広く、通路と展示ブースの区切りがない
  - (2) 展示物やパーティションが障害物となる
  - (3) 数百人の来場者・展示者が会場内を歩行している
- これらの要素は電波強度を不安定にし、パケットロスを発生させる要因となる。我々はこれに対処するため、タンデムスキャナを用いてパケットの安定した受信とそのデータを使った位置推定を目指した。

### 3. G 空間 EXPO2016 でのデータ収集

G 空間 EXPO2016 は地理空間情報の活用を目指して産官学が連携して行った展示会で、日本科学未来館で 2016 年 11 月 24 日から 26 日までの三日間開催され、のべ 19138

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 名が実験に参加した。今回、位置推定の対象となる範囲は展示ブースのあるエリアで、横約 70m× 縦約 23m の広さである。

#### 3.1 利用機材

実験で利用した機材を表 1 に示す。今回の実験では被験者の位置をトラッキングするために、高精度測位を行う UWB タグを利用した。実験中の被験者の様子を図 1 に示す。UWB タグは障害物に弱いため頭に装着し、BLE タグはネームホルダーに入れ首から下げるようにした。また、同時に行っていた他の実験のために、被験者は Android 端末と環境センサ EveryStamp[12] も首から下げていた。BLE タグは設定の異なる 3 個を 1 セットとして使用していたため、この設定を表 2 に示す。

BLE タグはいずれも iBeacon 形式のパケットを送信する設定とした。送信パワーは BLE タグから 1m の距離で観測されるべき電波強度で、-59dBm は iBeacon のデフォルト設定である。環境に設置したスキャナの詳細については 3.2 節に示す。

#### 3.2 スキャナの設置

スキャナは図 3 から図 5 に示すような外見をしており、図 6 に示す場所に配置した。タンデムスキャナは図 6 のうち 1 から 11 までであり、1 から 10 は十字形に 4 つの、11 は並列に 7 つの Bluetooth アダプタを備えている。タンデムスキャナの Bluetooth アダプタには図 6 で示すような番号が振られていた。12 番以降のスキャナは 1 つの Bluetooth アダプタを備える。Bluetooth アダプタは ELECOM 社 LBT-UAN05C2 および IO DATA 社 USB-BT40LE を利用した。

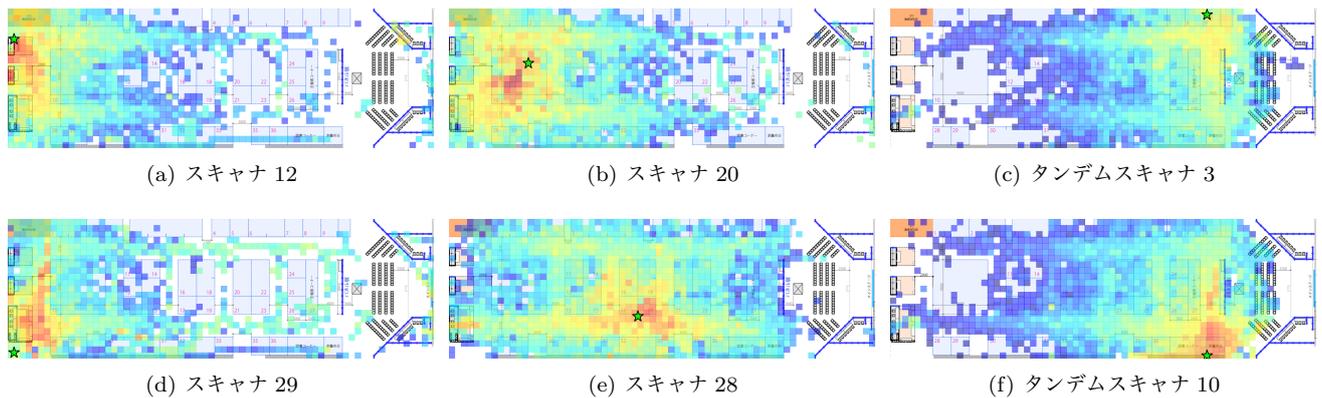


図 7 スキャナごとの受信電波強度分布の違い (最大値)

### 3.3 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2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。

## 4. 受信電波強度の基礎分析

この章では、会場を1m単位のセルに区切り、その各位置から送信されたパケットが、各スキャナによりどれくらいの受信電波強度で観測されたかを示す。被験者の位置はUWBタグによる高精度測位データを利用した。

### 4.1 受信電波強度の最大値, 平均値

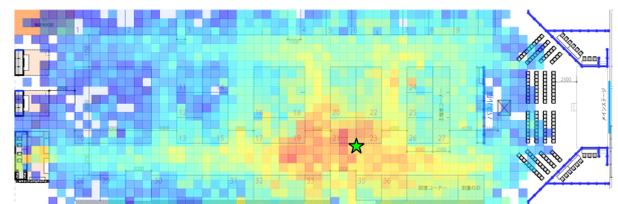
会場を1m端で区切った各セルで送信されたBLEパケットの受信電波強度の最大値, 平均値をヒートマップとしてプロットした。タンデムスキャナの場合は、すべてのBluetoothアダプタの情報を統合して扱った。タンデムスキャナ6の例を図8に示す。

各図において緑色の星印はタンデムスキャナ6の位置を示す。図8(a)と図8(b)ではセルの色は受信電波強度に対応し、-55dBmから-95dBmの範囲で描画した。受信強度とセルの色の関係については図8(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パケットがひとつも受信されなかったことを示す。

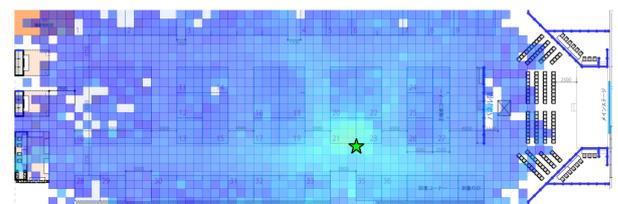
図8(a)を見ると、受信電波強度はスキャナ周辺で強い値を記録しており、離れるにつれて弱くなる。しかし、スキャナ位置を中心とした放射状の分布とはなっておらず、通路に沿って分布している。これは、ブースの壁が電波強度に影響を及ぼしたためであると考えられる。また、図8(b)を見ると、受信電波強度の平均値は会場のほぼ全域で大きな差がなく、位置推定での利用は難しい。

### 4.2 スキャナごとの受信電波強度分布

図7にスキャナ12, 20, 28, 29およびタンデムスキャナ



(a) 最大値



(b) 平均値



(c) セルの色と受信電波強度

図 8 タンデムスキャナ6の受信電波強度分布

3,10の受信電波強度の最大値の分布を示す。すべて-55dBmから-95dBmで描画し、受信強度と色の対応は図8(c)に示すとおりである。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、位置推定に利用できると考えられる。また、どの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では強い受信電波強度が図の上下方向に現れており、壁等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。

### 4.3 タンデムBLEスキャナのBluetoothアダプタごとの差

タンデムスキャナは複数のBluetoothアダプタを備え、それぞれが違う方向を向いているため、アダプタごとに受信電波強度分布が異なるかどうかを調べた。タンデムスキャナ6の例を図9に示す。受信強度と色の対応は図8(c)

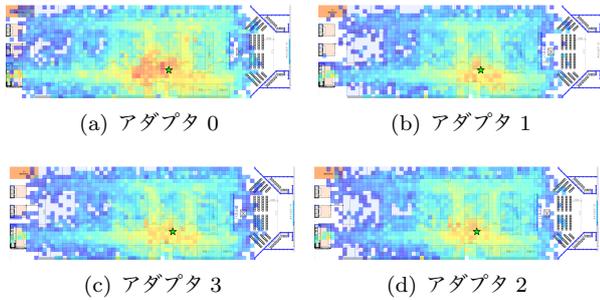


図9 タンデムスキャナ6のBluetoothアダプタごとの受信電波強度分布

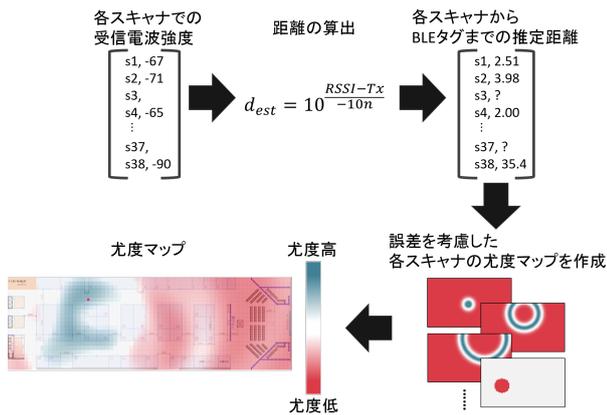


図10 (III) 電波受信強度からの尤度マップ生成

に示すとおりである。図9(a)に示すアダプタ0のみ強い受信電波強度を示す赤いエリアが多いことが分かる。また、アダプタ1, 2, 3ではそれぞれ差分をとってもあまり大きな変化は見られなかった。このことから位置推定時に利用するアダプタによって精度が変化する可能性が考えられる。

## 5. 利用する位置推定手法とパラメータ調整

### 5.1 ベースとする位置推定手法

位置推定手法は、我々の以前の手法である三点測位とパーティクルフィルタを組み合わせた手法 [1] をベースとする。この手法の概要を示す。推定は以下の (I) から (V) の手順で行われる。

- (I) 初期位置の指定
- (II) パーティクルの移動
- (III) 電波受信強度から尤度マップを生成
- (IV) 尤度のマップに従ってパーティクルに重みを付与
- (V) リサンプリング

(I) 実験受付を初期位置として推定を開始する。(II) から (V) は毎秒行われ、被験者の位置を推定する部分である。(II) パーティクルを移動させる。移動量は人の歩行速度をもとに最大 1.2m としている。(III)(IV) 各スキャナでの受信電波強度から算出した各スキャナと BLE タグの距離  $d_{est}$  をもとに尤度マップを生成し、パーティクルに重みを付与する。図10に (III) の流れを示す。ここでは、以下

の式1を用いて受信電波強度  $RSSI$  からスキャナと BLE タグ間の距離  $d_{est}$  を算出する。

$$d_{est} = 10^{\frac{RSSI - Tx}{-10n}} \quad (1)$$

式 (1) 中の  $Tx$  と  $n$  はそれぞれ送信パワーと減衰定数である。送信パワーは BLE タグから 1m での受信電波強度、減衰定数は空間 (電波が反射しやすいかどうか) に応じた値となっている。この値は式 (1) の急峻さに影響し、大きい値を使うほど電波が近距離でも減衰しやすい環境に対応し、受信電波強度における 1dBm の差を小さな距離の差にする。距離  $d_{est}$  は誤差を含むと考えられるため、尤度マップの生成時は距離  $d_{est}$  を平均値とし、固定の標準偏差  $\ast 13.0$  を持つ正規分布  $\mathcal{N}(d_{est}, 3.0^2)$  を用いてスキャナと尤度マップのセルとの距離に応じた正規分布の値を尤度として割り振る。

この操作を電波を観測した各スキャナに対して行い、各スキャナの尤度マップを求める。電波を観測しなかったスキャナでは、周囲に BLE タグがないものとして、周囲の尤度を 0 とした尤度マップを生成する。これら各スキャナの尤度マップを加算したものを最終的に利用する尤度マップする。

(V) リサンプリングでは尤度マップから各パーティクルに尤度を割り振り、事前に設定した閾値を超えたパーティクルのみを残す。

### 5.2 改善を加えた位置推定手法

上記の位置推定手法では平均誤差が 20m 程度となり高精度な結果を得られなかったため、いくつかの改善を行った。変更点を以下に示す。

#### 5.2.1 尤度マップの生成の変更点

- (1) 時刻  $t$  においてスキャナで受信記録がない場合でも尤度 0 のエリアを生成しないよう変更
- (2) 尤度マップの生成時、スライド窓を利用し、各スキャナでの最大の受信電波強度を利用
- (3) 受信電波強度-距離関数の送信パワー  $Tx$  と減衰定数  $n$  をパラメータ化
- (4) 距離の誤差に用いる標準偏差  $\sigma$  のパラメータ化

(1)5.1 で示したベースとした手法では時刻  $t$  での尤度マップを作る際、BLE タグからのパケットを受信していないスキャナについては、周囲の尤度を 0 としていた。しかし、パケットロスが頻繁に発生し、BLE タグが周辺にあってもスキャナがパケットを受信しない場合が多く発生するため、周囲の尤度を 0 にせず、一様分布を生成することとした。

(2) ベースとした手法では、利用していた BLE タグの広告周期が 1 秒 (1Hz) だったため、時刻  $t$  での受信パケット

\*1 論文 [1] では分散 3.0 と表記していましたが、正しくは標準偏差 3.0 でした。お詫びして訂正いたします。

から尤度マップを生成していた。しかし、周期の変更やパケットロスの発生を考えると過去数秒分のパケットを利用するほうが安定して位置推定ができると考えられる。そこでスライド窓を利用し、過去  $w$  秒分の受信パケットから最大値を選び出して利用する。図 8 に示したとおり、会場内の各地点から送信されたパケットの受信電波強度は平均を取ると地点ごとの特徴が出ないため、最大値とした。窓幅  $w$  は変更可能なパラメータとした。大きな  $w$  ではより長い期間の受信電波強度から位置を推定する。窓のスライド幅については 1 秒ごとの推定を行うために 1 秒で固定とした。

(3) 今回は BLE タグの送信パワーをパラメータとし、送信パワーの設定の違う BLE タグに対応できるようにした。さらに減衰定数もパラメータとした。(4) 受信電波強度から距離を出した後、その距離を平均として、正規分布を利用して尤度マップを生成していたが、正規分布に用いる標準偏差  $\sigma$  を固定値でなくパラメータとした。大きい  $\sigma$  を与えると、受信電波強度から算出した距離が大きな誤差を含むものとして扱われる。

### 5.2.2 パーティクルフィルタの変更点

- (1) パーティクルのリサンプルを閾値によるものから等間隔リサンプリングに変更
- (2) パーティクルの最大移動速度をパラメータ化

(1) 閾値によるリサンプルはスキャナ台数などに影響されるため、等間隔リサンプルを用いるよう変更した。また、(2) パーティクルの最大移動速度  $s$  をパラメータとし、変更可能にした。大きい  $s$  を設定するとより広い範囲から位置を推定する。

### 5.3 パラメータの最適化

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み合わせを用いて精度が高いものを調べた。パーティクルの最大移動速度 1.2m/s と受信電波強度-距離関数の減衰定数 1.906 はベースとした位置推定手法での値である。

- スライド窓の窓幅  $w$ : 1, 3, 5, 10(秒)
- パーティクルの最大移動速度  $s$ : 1.0, 1.2, 2.0, 3.0, 4.0(m/s)
- 受信電波強度-距離関数の減衰定数  $n$ : 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  $\sigma$ : 1.0, 2.0, 3.0, 4.0(m)

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、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

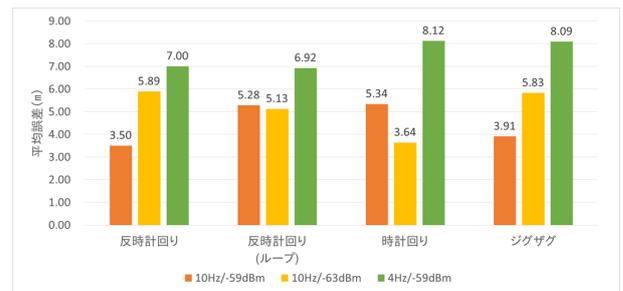


図 11 BLE タグの設定による平均誤差の変化

用の UWB タグのデータを利用した。利用した経路は 3.3 節に示した 4 経路である。全組み合わせの評価の結果、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  $(w, s, n, \sigma) = (1, 4.0, 1.906, 4.0)$  だった。以降の位置推定ではこれを利用する。

## 6. 位置推定精度

この章では、5.2 節で述べた手法を用いて、BLE タグの設定や、スキャナの変更した際の精度を検証する。経路は 3.3 節の 4 経路を用い、位置推定手法のパラメータは 5.3 節で述べたものを利用した。

### 6.1 BLE タグの設定による精度変化

3.1 節の表 2 で示した通り、今回の実験では被験者が設定の異なる 3 つのタグを同時に携帯していたため、広告周期と送信電波強度による精度への変化があるかを検証する。各経路での 3 名の被験者の平均誤差を図 11 に示す。いずれの経路でも、広告周期が 0.25 秒 (4Hz) で送信パワーが -59dBm 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、広告周期が 0.1 秒 (10Hz) 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、送信パワーの 4dBm の差は精度に大きな影響を与えず、広告周期が影響を与えると考えられる。

### 6.2 利用するスキャナ台数による精度変化

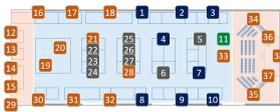
会場内のスキャナ配置は図 6 に示したとおりであるが、スキャナ 12 から 15 および 12 から 28 は利用するスキャナの台数により精度にどのような変化が起きるかを検証するため、高密度に設置した。そこで、会場右側と同じ程度の密度となるよう会場左側の一部のスキャナを利用しないで位置推定を行った。また、中心部の島のスキャナが 1 つずつになるように利用するスキャナを制限した場合も検証した。各設定で利用されないスキャナを図 12 にグレイアウトさせて示す。結果は図 13 に示す。図 12(a) のように左側の密度を調整する場合は、時計回りの経路で 1m ほど精度が変化するものの、他の 3 経路で精度に大きな変化は生じなかった。一方、図 12(b), 12(c) のように中心部の島で利用できるスキャナを制限した場合は 0.5m から 2m ほどの精度変化がみられた。

表 3 タンデムスキャナの利用 Bluetooth アダプタによる精度の変化

利用アダプタ	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)	利用アダプタ	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)
0,1,2,3	4.51	2.44	1,2,3	8.40	4.24
0,1,3	5.24	2.58	2,3	8.76	4.16
0,2,3	5.31	2.59	1,3	10.1	4.63
0,3	5.37	2.75	3	10.2	3.88
0,1,2	5.46	2.66	1,2	10.8	5.42
0,2	5.59	2.77	2	11.7	4.62
0,1	5.66	2.89	1	14.69	5.54
0	5.83	2.89			



(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 12 一部のスキャナを利用しない設定

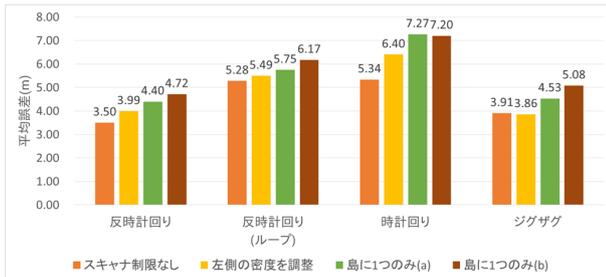


図 13 一部のスキャナを利用しない場合の平均誤差の変化

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

パケットロスへの対策として構築したタンデムスキャナは、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。タンデムスキャナ 1 から 11 のアダプタ 0,1,2,3 から得られる 15 通りの組み合わせについて、それぞれ位置推定を行った。結果を平均誤差が小さい順にソートして表 3 に示す。表より、最も良い精度を達成できるのはタンデムスキャナのすべてのアダプタを利用した場合で、利用するアダプタを減らすと徐々に平均誤差が大きくなり精度が悪くなっていくことがわかった。また、アダプタ 0 は単体で利用しても平均 5.8m の精度であり、利用しない場合は精度が大きく落ち込んでいる。

タンデムスキャナのアダプタ配置は図 6 に示したが、アダプタ 0 はタンデムスキャナ 1,2,3,6,7 では壁側を向き、4,5,8,9,10 では通路側を向いていた。しかしアダプタ 0 と反対方向を向いていたアダプタ 2 は単体では 12m の精度となっており、差が生じている。これは、アダプタ 0 での

表 4 Bluetooth アダプタごとの平均パケット受信数

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

受信数が多かった [13] 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 4 に示すとおりで、アダプタ 0 が多い。

### 6.4 最良の設定での軌跡

図 14 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。この時のパーティクルフィルタのパラメータは 5.3 節に示したもので、BLE タグは広告周期 0.1 秒 (10Hz) で送信パワー -59dBm の設定を用い、会場内すべての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を示している。また、表 5 に通常のスキャナを設置していた会場の左半分と、タンデム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 14(a) と図 14(c) では経路を復元できているが、途中でジャンプしたように点が動いている箇所がある。これは、表 5 で左半分と右半分の精度に 1m 程度の差が生じた原因だと考えられる。また、図 14(b) と図 14(d) では概形をおおよ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とが表 5 において標準偏差が左半分で大きくなっていることから分かる。いずれの経路もタンデムスキャナを設置していた右半分で 1m 程度精度が良い。また、図 14(a) から 14(d) のいずれでもブースを横切るように点が移動している部分があるため、マップマッチングを導入し、ブースのパーティションを超えられないように調整を行えば精度を改善できる可能性がある。

### 6.5 議論

5.3 節では、最良のパラメータセットが  $(w, s, n, \sigma) = (1, 4.0, 1.906, 4.0)$  だった。スライド窓の窓幅  $w$  が 1 秒だった理由として、位置推定時は窓内での最大の受信電波強度を利用するため、長い窓幅を用いると過去の位置で計測さ

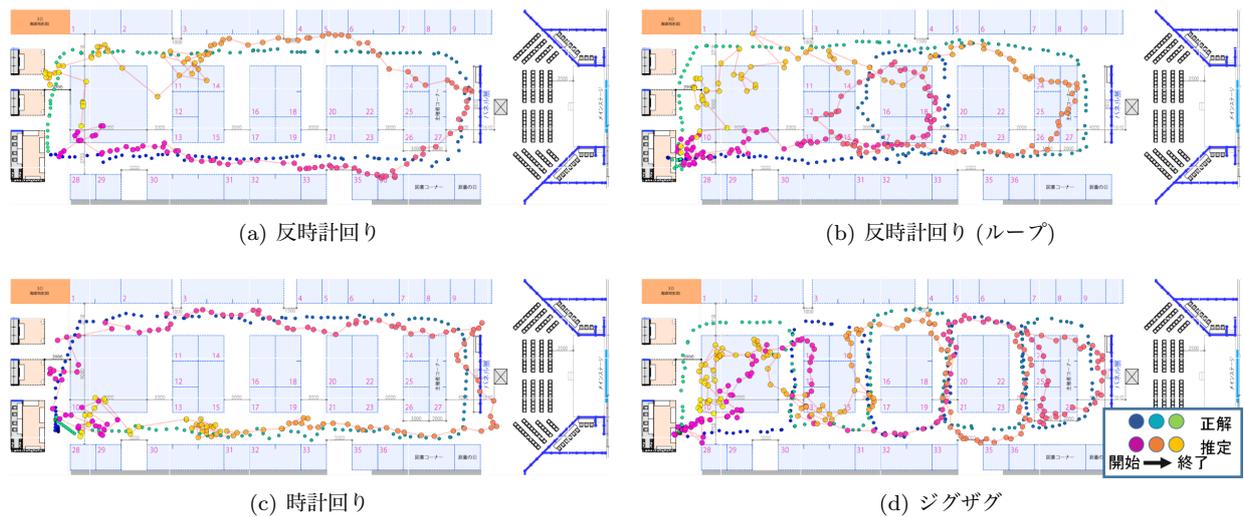


図 14 各経路において精度が最も良い軌跡

表 5 図 14 の各経路における会場内左右での精度

経路	左半分		右半分	
	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)
反時計回り	3.42	1.68	2.30	1.35
反時計回り (ループ)	3.84	1.74	2.76	1.10
時計回り	4.38	2.78	2.33	0.98
ジグザグ	3.80	1.92	3.43	0.95

れた受信電波強度が利用され、精度が下がることが考えられる。また、パーティクルの最大移動速度  $s$  が  $4\text{m/s}$  となった理由としては、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。受信電波強度-距離関数の減衰定数  $n$  はベースとした位置推定手法と同じものが選ばれた。これは、受信電波強度における  $1\text{dBm}$  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、受信電波強度から算出した距離  $d_{est}$  が含む誤差に対応する  $\sigma$  は大きな値となった。これは、受信電波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電波強度が不安定で、式 (1) 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、6.1 節および 6.2 節より BLE タグの広告周期が短いほど、タンデムスキャナの利用 Bluetooth アダプタが多いほど高精度に推定できた。したがって、高精度な推定には受信電波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。

また、6.3 節より、スキャナを設置する台数を変化させると精度も変化することがわかった。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スキャナの台数を減らすと良いと考えられるが、具体的に必要な台数についてはわかっていない。

## 7. おわりに

本研究では、BLE 技術を利用した屋内位置推定について、G 空間 EXPO2016 で行われた実験のデータを用いて精度を検証した。実験には、パケットロスを減らす目的で構築したタンデムスキャナを用いた。UWB タグによる高精度測位によって取得した被験者位置から、会場内各地点で送信されたパケットが各スキャナでどれくらいの受信強度になるか調べると、最大値は距離に応じて差が出た一方で、平均値は距離による変化が見られなかった。位置推定では以前の位置推定手法 [1] に改善を加え、パラメータを最適化したものを利用した。

位置推定精度は BLE タグの設定 (広告周期, 送信パワー)、利用するスキャナ台数、タンデムスキャナの利用 Bluetooth アダプタの変更でどのように変化するかを検証した。結果、以下のことがわかった。

- BLE タグの送信電波強度は  $4\text{dBm}$  の差では精度は大きく変化しない
- BLE タグの広告周期が短い場合、精度が上がる
- 高密度だった会場左側のスキャナを一部利用せず、右側と同程度の密度になるよう設定しても精度は大きく変化しない
- タンデムスキャナの一部のアダプタを利用しない場合、精度が下がる

今後の課題としては、より多彩な BLE タグの設定、スキャ

ナの設定での実験と、他の環境での精度の検証などがあげられる。また、fingerprintingによる位置推定も検討したい。

キャナの受信性能評価. 情報処理学会第79回全国大会, pp. 3317–3318, 2017.

本研究はG空間EXPO2016屋内測位×IoT実証実験実行委員会の協力で行われた。記して感謝する。

#### 参考文献

- [1] Kenta Urano, Kei Hiroi, Katsuhiko Kaji, and Nobuo Kawaguchi. A Location Estimation Method using BLE Tags Distributed Among Participants of a Large-Scale Exhibition. In *International Workshop On Mobile Ubiquitous Systems, Infrastructures, Communications, And Applications (MUSICAL 2016)*, pp. 119–124, 2016.
- [2] 浦野健太, 廣井慧, 河口信夫. 配布型 BLE タグを用いた IoT 位置トラッキングシステムの構築. HCG シンポジウム 2016, pp. 56–60, 2016.
- [3] Stephane Beauregard and Harald Haas. Pedestrian Dead Reckoning: A Basis for Personal Positioning. In *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp. 27–35, 2006.
- [4] Paramvir Bahl and Venkata N Padmanabhan. RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, pp. 775–784, 2000.
- [5] Moustafa A. Youssef, Ashok Agrawala, and A. Udaya Shankar. WLAN Location Determination via Clustering and Probability Distributions. In *Pervasive Computing and Communications, 2003.(PerCom 2003). Proceedings of the First IEEE International Conference on*, pp. 143–150, 2003.
- [6] Yanying Gu, Anthony Lo, and Ignas Niemegeers. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 2009.
- [7] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, pp. 1067–1080, 2007.
- [8] Ubisense. <http://ubisense.net/en>.
- [9] Ramsey Faragher and Robert Harle. Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons. *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, pp. 2418–2428, 2015.
- [10] Kiyooki Komai, Manato Fujimoto, Yutaka Arakawa, Hirohiko Suwa, Yukitoshi Kashimoto, and Keiichi Yasumoto. Beacon-Based Multi-Person Activity Monitoring System for Day Care Center. In *2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 1–6, 2016.
- [11] 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), pp. 1–6, 2014.
- [12] EveryStamp. <https://every-sense.com/services/everystamp/>.
- [13] 浦野健太, 廣井慧, 河口信夫. IoT 位置トラッキングシステムの構築を目的とした実環境におけるタンデム BLE ス