

第7部

特集7 Internet of Things in WIDE Project

- 2つの実証実験を通じて -

廣井 慧、河口 信夫

第1章 はじめに

モノのインターネット(IoT)というキーワードが広く使われるようになる前から、WIDEプロジェクトには、様々なモノをインターネットに接続するための幅広い活動をしてきた実績がある。例えば2001年のInteropにおけるInternet Node (例えばIPv6温度計)や、iCAR WG (2002年～)、LiveE!プロジェクト(2005年～)など、我々は実世界の様々な事象をインターネットを通じて取得してきた。最近、急速にIoTというキーワードが広がったのは、BluetoothLow Energy (BLE)の登場や、スマートフォンの普及などにより、誰もが身近にこれらのデバイスを活用できることになったことと、デバイスの低価格化によって、実ビジネスへの投入が増大しつつあることが理由であろう。

WIDEプロジェクトでは、2015年9月の合宿のテーマを「Sensing!」とし、あらためてIoT関連の現状を確認すると同時に、実際に、152式のBLEタグを全参加者の名札として配布すると同時に、ポスター発表などにもタグづけし、その活用方法を探った。また、G空間EXPO2015においても、NPO法人Lisraが主導する「屋内位置情報サービス実証実験」に参加し、BLEタグやAndroidデバイスを配布して、人の位置計測に基づくサービスの提供実験を行った。

以下では、それらについて説明する。

第2章 2015年秋合宿研究会におけるIoT実験報告

2.1 実験の概要と目的

2015年9月1日(月)から4日(木)に長野県長野市信州松代ロイヤルホテルで開催された、2015年秋合宿研究会では、BLEタグの位置を推定するためのデータ収集およびWeb of Thingsを実現するシステムの開発を行った。合宿研究会の実験は、IoTデバイスを参加者やポスター発表に紐付け、その活用方法を探ることを目指し、以下の2項目の実施を具体的な目的とした。なお、本実験で用いたデータ収集およびWeb of Thingsシステムは、Camp-1509プログラム委員会および神戸情報大学院大学、慶應義塾大学、名古屋大学、北陸先端科学技術大学院大学が企画、開発を行った。

2.1.1 タグ配布型での大規模イベント環境での収集環境の構築と実環境での動態確認

本実験の目的は、配布型のBLEタグを用いた参加者情報の収集に必要な環境を検討し、収集データを位置推定に利用するために必要な事項や期待できる精度を把握し、今後の利用検討に発展させることである。店舗や室内の特定箇所にBLEタグを設置する、BLEタグ固定型のシステムは既に研究開発が進められ、位置推定や移動軌跡推定の商用利用が行われている。しかし、単なる位置推定や軌跡推定にとどまらず、大規模イベント環境において、参加120個を超えるBLEタグが数日間を通して自由に動きまわり、その移動や行動を分析し活用するためには、容易な活用が見込めるタグ配布型でのビーコンの利用が有効だと考えられる。そのため、本実験ではBLEタグを配布し、大規模イベント環境での収集環境の構築と実環境での動態確認を目的とした。

2.1.2 Web of Thingsシステムの開発と参加者の位置推定への活用

配布するBLEタグから収集されるデータを利用した、Web of Thingsシステムとして、ポスター / デモ展示の情報を参加者に提示し展示者へのフィードバックを返す“ExCloud”、相手の研究情報や場所を提示する“Who is Around?”、“Who is Where”の3つのシステムを開発した。開発したシステムを参加者に提供し、合宿研究会期間中の運用を通じて活用の方向性を模索することを目的とした。このうち本報告ではIoTデバイスを用いてできることのひとつとして、参加者の場所の推定を中心に述べる。大規模イベントでの、参加者の場所の特定は、各セッションへの参加状況や参加者の行動追跡など、イベントへの分析やそのフィードバックを可能にする新たなサービスの誕生が期待できる。そのため、本報告では合宿研究会におけるIoT実験について、収集環境の構築と実環境での動態確認の観点でデータ収集と位置推定に関わる分析の報告を行う。各Web of Thingsシステムの目的や詳細については、2015年5月研究会および合宿研究会プログラム報告に詳述する。

2.2 実験環境

2.2.1 BLEタグ

(a) 配布対象と配布方法

BLEタグは152個配布を行った。配布対象は、合宿参加者120名および、ポスター / デモ発表セッション(プログラムは「WIDE Exhibition Show」)に出展された32項目の発表である。参加者の名札に各参加者の情報が紐付けされたBLEタグを封入し、受付時に参加者に配布した。合宿研究会参加中、参加者は常に同じ位置でBLEタグを持ち歩いている状態とした。

表2-1 ビーコンの設定値(参加者、展示)

Proximity UUID	57494445-2043-616D-7020-323031353039
major	参加者: 1, 展示: 2
minor	参加者: 1-1900 (WIDE 番号), 展示: 1-32 (展示ブース番号)
TxPower	-69 dBm
Adv. Interval	3000 msec

(b) ビーコンの種類と設定

配布したBLEタグは、1種類とし、Nordic Semiconductor社のnRF51822 BEACONを用いた。各BLEタグは、iBeacon規格に準拠するよう、表2.1に示す値で、advertising packetのProximity UUID、major、minorを設定した。Proximity UUIDは、“WIDE Camp201509”をアスキーコードで表記したものである。これらの情報を含んだadvertising packetを送信電力(Tx Power) -69dBmで、3000ミリ秒に1度送信するように設定した。受信機間の最大距離は30mであり、合宿研究会の環境下で少なくとも2つ以上の受信機でBLEタグの電波を受信できる送信電力を検証し、この値とした。

2.2.2 データ収集環境の構築

(a) 受信機の構成

BLEタグのadvertising packetを受信し、データベースへ送信するため、Raspberry Pi Model Bを含む図3.2の機材を用いて受信機を構成した。受信には、BLE対応USBホストアダプタをRaspberryPiに接続し、node.js^{*1}を用いて、受信機周囲のadvertising packetを検出する。さらに、検出したadvertising packetから、BLEタグデータとしてUUID、major、minor、送信電力、RSSI、proximityの値を取得した。次に、検出と変換を行ったビーコンデータに受信機番号と送信時間を付与し、Fluentdを用いてデータベースInfluxDBへ送信した。送信にはバッファ機能は使用せず、受信したadvertising packetをBLEタグデータに変換し順次送信している。送信のネットワークとして、Raspberry Piに無線LANアダプタを接続し、合宿研究会の無線ネットワークを利用した。

表2-2 受信機の使用機材

Model	Raspberry Pi Model B
OS	Raspbian (Debian 7.8)
ビーコン受信 I/F	BLE 対応 USB アダプタ (LBT-UAN05C2)
データ送信 I/F	無線 LAN アダプタ (WN-G150UMK)

*1 node.js : <https://nodejs.org/en/>

(b) 受信機の設置位置

構成した受信機13台を会場内の図2.1に示す位置へ設置した。会場の用途と設置位置の詳細を表2.3に示す。Room1はBoFセッションを行う部屋であり、部屋の大きさが小さいため、設置する受信機は1台とした。Room2は、120名が一堂に会するPlenaryセッションを行う部屋として用いる。座席配置はスクリーン形式で、参加者のほぼ全員が部屋前方のスクリーンを見ており、セッション中の参加者の動きが少なくと予想されるため、前方の左右2ヶ所に受信機を設置した。Room3は合宿研究会の会場で最も大きな部屋であり、120名が一堂に会するうえ、ポスター/デモ発表セッションが行われる部屋であり、参加者は

表2-3 受信機の設置台数

会場	用途	台数
Room 1	BoF セッション	1
Room 2	Plenary セッション	3
Room 3	ポスター/デモ発表セッション	4
Discussion Space	談話スペース	1
Room 3	開発用	3

セッション中に部屋内を動き回ることが予想された。そのため、参加者がどの方向を向いてもBLEタグの送信するadvertising packetが検出されやすいよう、部屋の四隅にそれぞれ1台ずつ受信機を設置した。上記の3部屋のほかに、談話スペースや喫煙部屋が近くにあり、参加者が集まりやすい場所として、Discussion Spaceに1台受信機を設置している。なお、開発用は位置を固定せず部屋内の様々な位置で用いたため、図2.1には位置を記載していない。

(c) システム構成

構築したデータ収集環境を図2.2に示す。設置した13台の受信機から、Fluentdを経由してInfluxDBにBLEタグデータが収集される。参加者は、iosやAndroidなどの端末を利用して、周囲にあるBLEタグに紐付けられた参加者、展示の情報をリストで閲覧することができる。

各参加者のいる場所は近接性方式を用いて推定した。参加者が検索したい参加者の名前をクリックすると、minorの値に応じ、InfluxDBに保存されたRSSIを検索する。BLEタグのadvertising packetは、複数の受信

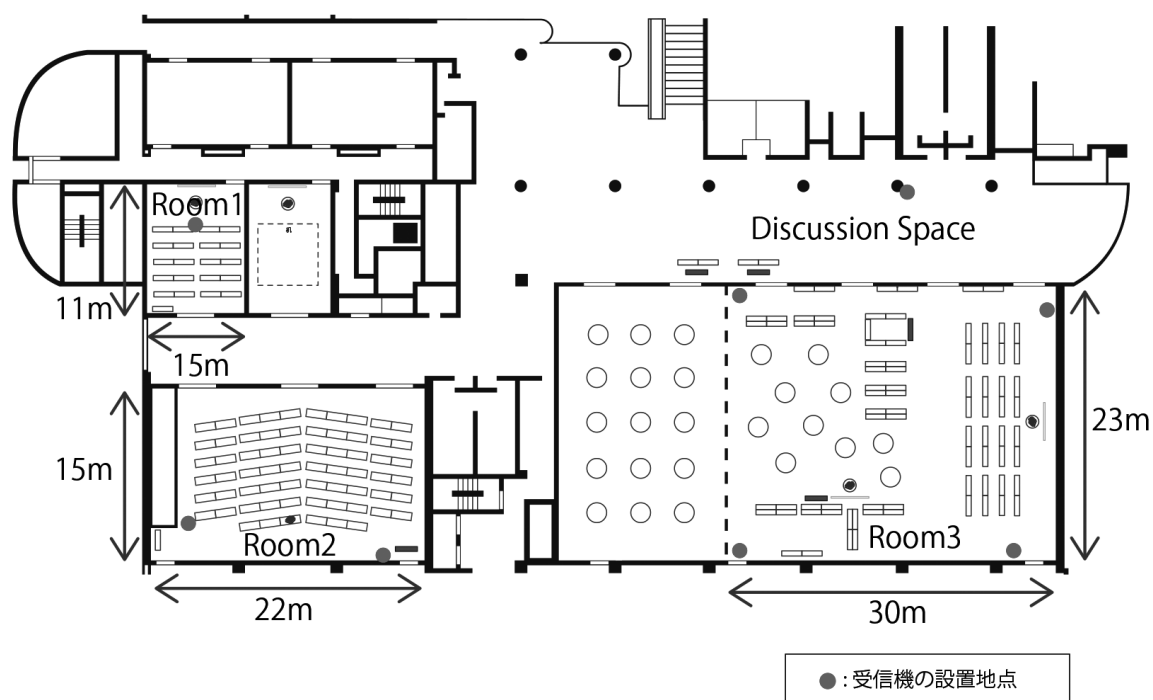


図2.1 2015年秋合宿研究会での受信環境

機で同時に検出されている。InfluxDBは、RSSIが最も大きい受信機名を返し、検索された参加者は該当受信機の周辺にいるものとして、提示される。また、iosやAndroid端末から展示をクリックすると展示の情報が検索され、あらかじめ用意した展示情報のデータから該当の展示の情報が返される。

2.3 データ分析

2.3.1 収集データ

BLEタグデータの収集とWeb of Thingsシステムの提供は、合宿研究会開催期間である、2015年9月1日(月) 14:30から9月4日(木) 12:00の期間で行った。この期間のBLEタグ検出回数を4に示す。4日間を通して、参加者に配布したBLEタグは2,197,050レコード、展示ブースに設置したBLEタグは1,309,586レコード、合計で3,506,636レコードを収集した。

合宿研究会のセッション開催時間は1日目が14:30-22:30、2、3日目が9:00-22:30、4日目が9:00-12:00であり、セッション開催時間中だけでも、参加者に配布したBLEタグは、4,536,000レコード分のadvertising packetを送信していたと考えられる。しかし、実際の参加者に配布したBLEタグの収集数はその約半数の2,197,050レコードであり、送信数に対して少ない値となった。

2.3.2 取得レコードの利用によるセッション参加状況の分析

図2.3は合宿研究会2日目に、会場の各部屋で検出されたBLEタグの時間推移を示したグラフである。

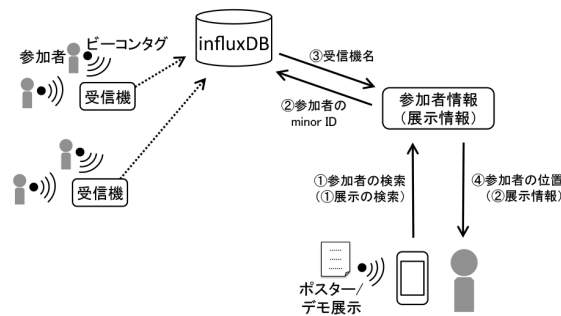


図2.2 BLEタグデータの収集システム

2日目の午前中は9:00から各部屋でBoFセッションが開催されており、それぞれの部屋でBLEタグが検出された。10:00前、11:00前に休憩やセッションの入れ替えがあり、各部屋の検出回数は一回減少し、再びセッションが開始する時間になると検出回数が増加することがわかる。同様に12:00や18:00は昼食、夕食の時間帯であり、参加者は受信機の設置されていない食事会場へ移動したため、BLEタグの検出回数は減少した。このことから、合宿研究会で構築した収集環境で、BLEタグの検出し、セッション参加状況を推定できることがわかった。

15:00から16:00はRoom2で招待講演がプログラムされていた。次の16:00からはBoFセッションがあり、再び人の移動が予想された。しかし、質問が多く発生したため、実際に招待講演のセッションが終了したのは、16:10頃だった。BLEタグの検出回数を見ると、減少は16:00を10分ほど過ぎてから始まっており、予定していたプログラムにはない、実際の合宿研究会のプログラム進行が反映され、プログラムに合わせてBLEタグ検出回数変動している。以上のように、セッション参加状況だけでなく、BLEタグの検出回数を確認することで、実際のプログラムの流れや合宿研究会参加者の動きがわかる。

2.3.3 位置推定への活用可能性

本実験の目的は、大規模イベント環境での配布型BLEタグデータ収集環境の構築と実環境での動態確認であり、参加者に配布したBLEタグの位置推定が行える環境は構築していない。構築した収集環境を、今後位置推定に役立てるため、取得したBLEタグデータを用いて、従来研究で行

表2-4 合宿研究会期間のBLEタグ検出回数

日程	参加者	展示	計
1 日目	665,172	426,965	1,092,137
2 日目	681,636	514,877	1,196,513
3 日目	737,265	367,744	1,105,009
4 日目	112,977	0	112,977
合計	2,197,050	1,309,586	3,506,636

われている位置推定手法を適用、検証し、位置推定を目指すうえで必要な事項を整理する。

100名近くの参加者が1つの部屋に集まった、合宿研究会2日目13:00から15:00までRoom3で行われたポスター / デモ発表のセッションで検出されたビーコンデータに対して、位置推定手法を適用した。BLEタグからの距離を電波強度から推定し、三点測位を行って位置を推定する三点測位方式を用いる。

(a) 三点測位方式の適用

Room3では4台の受信機されており、それぞれでBLEタグのadvertising packetを検出している。はじめに、各BLEタグについて、RSSIが大きい値となった受信機を上から3つ選定する。それぞれの受信機について、式1を用いて、受信機からBLEタグまでの距離 d を算出する[41, 42]。(ただし、 $n = 2.0$ 、 $A = -69[\text{dBm}]$)

$$RSSI = -10n \times \log_{10}d + A \quad (1)$$

次に3つの受信機からの重心を算出し、推定される参加者の位置とした。この位置推定を1分ごとに行い、ポスター / デモ発表のセッション時間中のすべての位置を算出した。その結果を図2.4に2次元平面上にヒートマップとして示す。なお、 N は算出に使ったBLEタグの数とする。

(b) 位置推定への活用可能性の分析

図2.4 (a)は13:00から15:00の2時間中の、一人の参加者の位置を示しており、図2.4 (b)は会場中で検出された全参加者の位置を示している。このセッションでは会場に11の展示がされており、図2.4 (a)に示す参加者は部屋内を動き回っていると考えられるが、実際に三点測位方式で算出された位置は会場内の一部にとどまった。これは、図2.4 (b)に示す、本セッションの参加者全員の位置でも同様の結果となり、会場内の一部の位置しか算出することができなかった。原因として、受信機の設置個数と位置が考えられる。三点測位には、同時に3つ以上の受信機でBLEタグのadvertising packetを検出することが必要となる。しかし、本実験では部屋内の詳細な位置推定は想定しておらず、部屋内の四隅のみに設置した。そのため、参

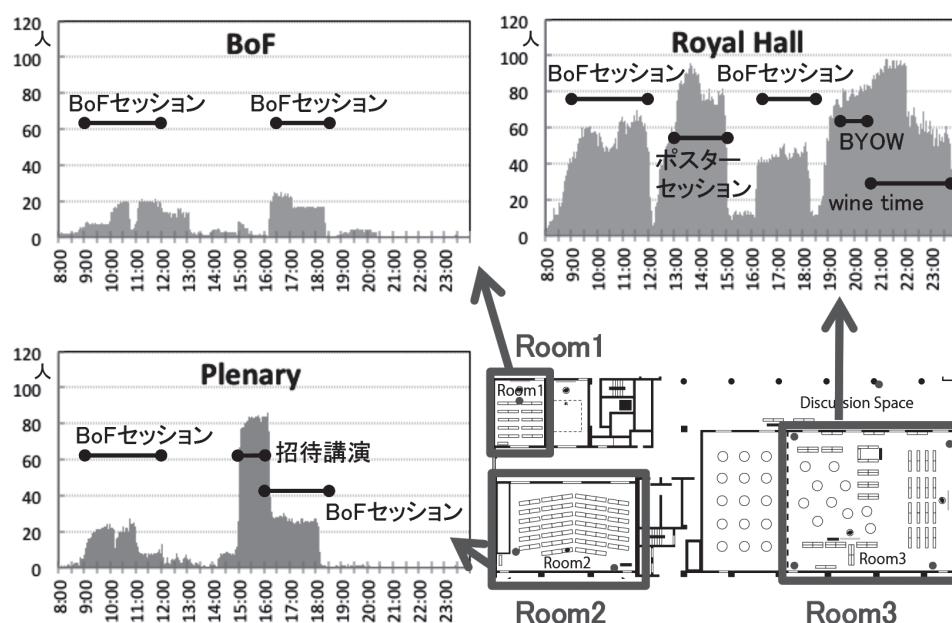


図2.3 合宿2日目会場各部屋におけるビーコン検出回数推移

加者が部屋の中心部にいるときのみ、3つの受信機での検出が可能となり、三点測位結果にも偏りが出たと考えられる。

2.4 考察

本実験では、タグ配布型での大規模イベント環境での収集環境の構築と実環境での動態確認および、Web of Thingsシステムの開発と参加者の位置推定への活用を目的として実験を行った。このうち、タグ配布型のBLEタグデータ収集環境の構築、Web of Thingsシステムの開発と運用という主な目標は果たすことができた。BLEタグデータ収集環境の構築、運用の結果、ポスター / デモ展示の情報や参加者の研究情報を提示するサービスとしては十分活用できた。今後このIoTデバイスを用いて位置推定へ活用するために以下の課題が考えられる。

- ・位置推定に活用可能なビーコンデータ収集環境の改善
- ・位置推定手法および正解データ取得方法の検討

第3章 G空間EXPO2015におけるIoT実験報告

3.1 実験の概要と目的

2015年11月26日(木)から28日(土) 10:00から17:00に日本科学未来館で開催された、G空間EXPO2015（参加

者累計18,856名)において、「G空間EXPO2015屋内位置情報サービス実証実験」として、以下に示す3つの実験を行った。

- ・ G空間EXPO見学サポート
- ・ WiFi測位を用いた会場のヒートマップ表示 / 3次元地図表示
- ・ レーザ測位による人の流れ計測

このうちG空間EXPO見学サポートでは、IoTデバイスを使用した、人の位置計測に基づくサービスの提供を目指し、合宿研究会の動態確認で得られた結果と課題を改善したうえで、以下の3項目を目的とした実験を行った。

なお、本実験を行ったG空間EXPO2015屋内位置情報サービス実証実験 実行委員会は、NPO法人位置情報サービス研究機構(Lisra)が主導し、以下の13大学、15企業が参加した。大学(名古屋大学 河川研究室、名古屋大学 間瀬研究室、はこだて未来大学 白石研究室、東京大学 江崎研究室、東京大学 森研究室、慶應義塾大学 清水研究室、慶應義塾大学 砂原研究室、静岡大学 峰野研究室、立命館大学 西尾研究室、奈良先端技術大学院大学 安本研究室、広島工業大学 秦研究室九州大学 廣川研究室、九州大学 峯研究室)、企業(アジア航測、IJ技術研究所、インテック、インフォキューブLAFLA、ATR

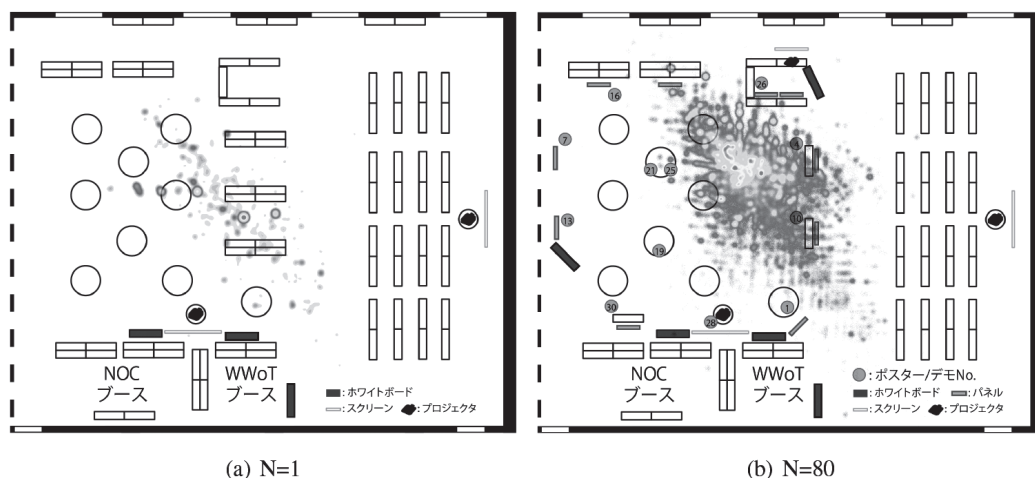


図2.4 三点測位による位置推定結果のヒートマップ

プロモーションズ、KDDI研究所、カナエジオマチックス、クウジット、構造計画研究所、CNS、シスコ、ジェナ、日立情報通信エンジニアリング、リニアテクノロジー、ミルディア)

3.1.1 大規模イベント環境でのビーコン配布モデルの検証

合宿研究会におけるIoT実験では、収集環境の構築と実環境での動態確認を目的にBLEタグの位置を推定するためのデータ収集実験を行った。本実験では、この収集環境を利用して、ビーコン配布型の位置推定を実現するビーコン配布モデルを構築し、その精度検証を行う。

合宿研究会では、各部屋に受信機を設置し、合宿研究会参加者の持つBLEタグが検出される受信機の提示とその情報の利用が目的であった。本実験では、受信機単位で部屋ごとに提示していたBLEタグの位置情報を拡張し、同じ室内の展示ブースごとに位置推定を目指す。展示ブースは約3m単位で区切られており、部屋内を自由に動き回る参加者に対して合宿研究会より詳細な位置推定を行う。合宿研究会での課題を踏まえ、位置推定に活用できるようにビーコンデータ収集数を増加した環境を構築するとともに、位置推定手法や正解データ取得方法についても検討を行った。

3.1.2 ハイブリッドPDRをはじめとする位置情報の収集

本実験では、BLEタグデータのほか、レーザ、Wi-Fi、ハイブリッドPedestrian Dead Reckoning (PDR) データといった様々なデータの収集を目的とした。各データ単体ではなく、複数の技術やデータを組み合わせたハイブリッドでの分析を進めることで、環境に合わせた容易な収集や推定精度の向上など位置情報を用いた研究展開が

期待できる。本実験では、ハイブリッドPDRデータとBLEタグデータ、レーザの計測データを組み合わせた分析を目的として、事前に被験者情報がわかっていない不特定の参加者について、これら複数のデータを容易に収集する環境を構築し、構築環境を用いてデータ収集を行う

3.1.3 「G空間EXPO見学サポート」

上記のビーコン配布モデルおよびハイブリッドPDRのデータ収集から得られるデータを活用し、参加者のG空間EXPO見学をサポートする取り組みを行った。見学サポートとして、参加者が見学をどのように行ったかを情報提示することとし、収集された参加者のデータから

- (a) 見学時間や歩数、移動距離、
- (b) 訪問した展示ブースのヒートマップ、
- (c) 滞在時間の長かったブース、おすすめのブース

を分析して情報提示した。これらの情報はA4用紙に図3.1に示すお持ち帰りシートを印刷し、参加者に持ち帰ってもらった。展示会場の入り口で参加者を募り、実験概要に同意すると、以下の手順でG空間EXPO見学サポートへ参加できる。

1. 受付にて参加者情報を記入
2. BLEタグ、Android端末を受け取る
3. 会場内見学
4. 受付にてBLEタグ、Android端末を返却
5. お持ち帰りシートを受け取る

3.2 実験環境

3.2.1 収集データ

本実験では、参加者にBLEタグと、Android端末を参加者に配布し、データを収集する。収集するデータは以下とする。

- ・被験者情報：性別、年齢、職業、役職、業務分野、参加目的(展示見学、講演を聞くため、出展・講演関係者等)、来訪理由(通りがかり、業務、知人・上司の紹介、webで知って等)
- ・BLEタグ：RSSI、加速度、地磁気
- ・Android：加速度、角速度、地磁気、GPS、BLE、圧力、歩数、回転ベクトル、Wi-Fi



図3.1 お持ち帰りシート

3.2.2 ビーコンの種類と設定

配布するBLEタグは、

- (1) Nordic Semiconductor社のnRF51822 SoCを搭載したBLEタグ、
- (2) ホシデン製HRM1017、
- (3) FDK製薄型BLEタグ

の3種類とし、合計で292個を準備した。それぞれの個数と取得したデータを表3.1に示す。(1)と(2)はiBeacon規格に準拠したadvertising packetの設定が可能であり、それぞれ表3.2に示す値で、advertising packetのProximity UUID、major、minorを設定した。(3)は、内蔵するセンサの値をBLE通信で送信できるタグであり、BLE RSSI、加速度(3軸)、地磁気(3軸)が取得可能である。設定を行ったBLEタグは参加者の名札に封入し、受付時に参加者に配布した。また、参加者に配布していないBLEタグは電池を切り、不要なadvertising packetが送信されないよう配慮した。

3.2.3 データ収集環境の構築

(a) 受信機の構成

BLEタグのadvertising packetを受信し、データベース

へ送信するため、Raspberry Pi Model Bを含む図3.2の機材を用いて受信機を構成した。受信には、BLE対応USBホストアダプタをRaspberry Piに接続し、BluetoothプロトコルスタックBlueZ^{*2}を用いて、受信機周囲のadvertising packetを検出する。さらに、検出したadvertising packetから、BLEタグデータとして検出時間、UUID、major、minor、送信電力、RSSI、proximityの値を取得した。

次に、検出と変換を行ったビーコンデータに受信機番号と送信時間を付与し、Fluentdを用いてデータベースMongoDBへ送信した。データの送信漏れを防ぐため、Fluentdのバッファ機能を使用し、5秒おきに行うとともに、BLEタグデータを各受信機へ保存した。合宿研究会ではnode.js、influxdbを用いてデータ収集を行ったが、advertising packetの送信数に比べ、検出数が少なかったため、改善としてBlueZ、MongoDBを用い、検出数の向上を図った。

合宿研究会の収集時は検出時間でなく送信時間のみを記録したが、本実験では検出時間、送信時間の2つ

表3-1 ビーコンの取得データ

製造	ビーコン モジュール名	個数	取得データ
1) Nordic	nRF51822	97	iBeacon(Proximity UUID、major、minor、RSSI)
2) ホシデン	HRM1017	100	iBeacon(Proximity UUID、major、minor、RSSI)
3) FDK	nRF51822	100	mac アドレス、BLE RSSI、加速度 (3 軸)、地磁気 (3 軸)

表3-2 ビーコンの設定値(参加者)

Proximity UUID	8ed8dd7e-7665-43c5-a911-788fb9249491	
1) Nordic	major	1
	minor	1-92
	TxPower	-69 dBm
	Adv. Interval	100 msec
2) ホシデン	major	2
	minor	1-100
	TxPower	-64 dBm
	Adv. Interval	100 msec
3) FDK	Adv. Interval	250 msec

表3-3 ビーコンの設定値(展示)

Proximity UUID	49aee68c-0e86-42a3-b632-20e1bf3de799
major	4
minor	1-44 (展示ブース番号)
TxPower	-69 dBm
Adv. Interval	100 msec

*2 BlueZ: <http://www.bluez.org/>

を時刻として記録した。全受信機およびBLEタグデータを保存するデータベースのあるサーバは5分おきにNTPを使い、時刻同期を行っている。送信のネットワークとして、安定的な通信を確保するため、有線LANで会場ネットワークに接続した。また、有線LANが敷設されていない箇所でも受信機を設置できるよう、3G USB dongleも準備した。Raspberry Piに3G USB dongleを接続し、SORACOM社のLTE/3Gモバイルデータ通信対応SORACOM Airを利用する予定であったが、本実験ではすべての受信機を有線LANに接続し、BLEタグデータの送信を行うことができた。

(b) 受信機の設置位置

(a)のように構成した受信機30台を会場内の図3.3に

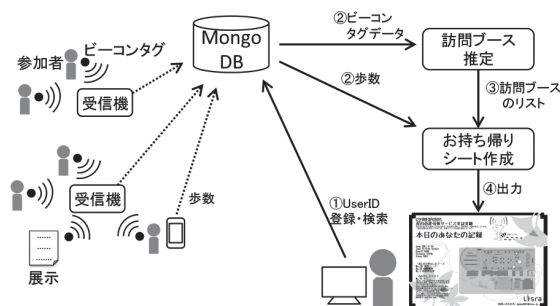


図3.2 BLEタグデータの収集システム

示す位置へ設置した。実験を行った会場は1つの部屋と廊下で構成される。会場の部屋は展示ブースのエリア、講演エリア、休憩スペースに分かれている。本実験では参加者が訪れた展示ブースの推定ができるよう、展示ブースに最も多くの受信機を設置することとした。設置間隔は10mを目安とし、図3.3の4-20の位置に17台設置している。

講演エリアでは、参加者の座る座席の位置を推定できるよう、4台の受信機を設置した。また、休憩スペースには2台の受信機を設置した。2台は休憩スペースと入り口の参加者の推定に用い、もう1台は訪れた参加者を推定できるよう受付近くに設置している。

表3-4 受信機の使用機材

Model	Raspberry Pi Model B
OS	Raspbian (Debian 7.8)
ビーコン受信 I/F	BLE 対応 USB アダプタ (LBT-UAN05C2)
データ通信 I/F	有線 LAN

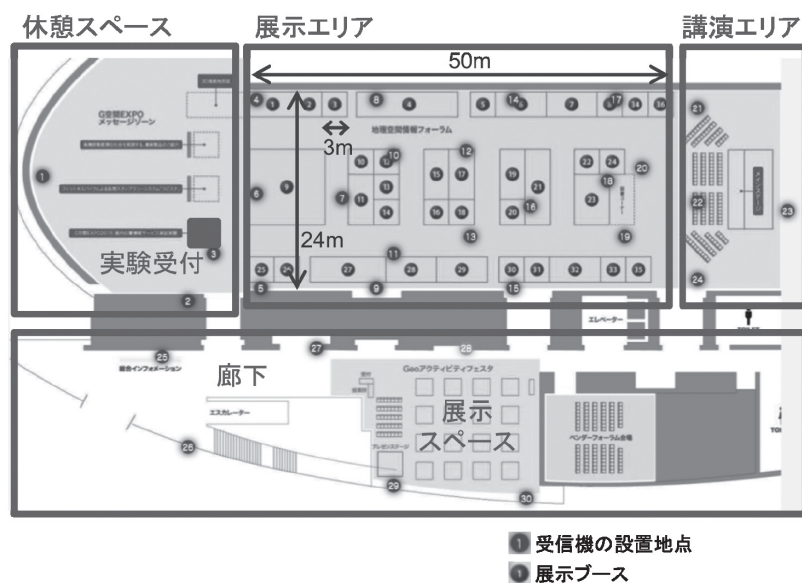


図3.3 G空間EXPO2015での受信環境

G空間EXPO2015では、廊下にも展示スペースが用意されており、参加者はこの展示スペースを訪れ長時間滞在されることが考えられた。そのため、廊下には6台の受信機を15-20mおきに設置した。

(c) システム構成

システム構成を図3.2に示す。設置した30台の受信機は、参加者の持つBLEタグや展示ブースに設置したBLEタグのadvertising packetを検出し、Fluentdを経由してMongoDBにBLEタグデータを送信する。参加者が実験を開始すると、受付では図3.4に示す監視画面で参加者にUserIDを割り振り、実験開始の処理を行う。見学を終え、受付に戻ると受付では該当UserIDを実験終了として処理する。図3.4の画面では実験実施中の参加者のUserIDと配布したBLEタグ、Android端末を一覧表示した。

また、MongoDBへ送信されたBLEタグデータをもとに受付にて各受信機の死活監視を行った。各受信機からMongoDBへ送信されたBLEタグデータの最新レコードを取得し、その送信日時をもとに、緑表示を「通常に受信機から送信が行われている状態」、黄色を「30秒間、受信機から送信が行われていない状態」、赤色を「180秒間、受信機から送信が行われていない状態」として、図3.3上に表示した。

(d) お持ち帰りシートへの情報提示

受付の操作者は図3.4の画面を使って、UserIDごとに実験開始時刻、終了時刻を記録する。これらの時刻は図3.1「お持ち帰りシート」の時刻の欄に反映される。



図3.4 BLEタグおよびAndroid端末の監視画面

実験終了時に、操作者はUserIDごとにMongoDBへの問い合わせを行い、該当UserIDのBLEタグデータを処理して、5秒おきの参加者の訪問ブースを推定する。これは、3.3.3に示すフィンガープリント方式を用いて推定した。推定結果はヒートマップとしてお持ち帰りシートに出力するとともに、訪問ブースのうち数が多いもの上位3つを、長く滞在した展示ブースとして記録する。

さらに、G空間EXPO2日目から、1日目の実験参加者の訪問ブースの記録をもとに、ユーザベース協調フィルタリングを行い、おすすめブースとして出力した。参加者の長時間訪問した3つの展示ブースと1日目の参加者の訪問ブースを比較し、長く滞在した展示ブースが一致した参加者の中から、その参加者が訪れていない展示ブースをおすすめブースとして情報提示する。

また、参加者がAndroid端末を持って実験に参加した場合、実験終了の処理を行うと、Android端末は参加者の歩数をMongoDBに送信する。歩幅を0.46mとして歩数から移動距離を算出し、これらをお持ち帰りシートに出力した。

3.3 データ分析

3.3.1 収集データ

本実験では、3日間で185名の参加者が集まり、BLEタグデータおよび、被験者情報を収集した。このうち、PDRデータを収集するため、Android端末を同時に持ち歩いた参加者は130名だった。

表3-5 G空間EXPO期間のBLEタグ検出回数

日程	参加者	展示	計
1日目	24,651,206	28,552,113	53,203,319
2日目	41,708,192	16,224,640	57,932,832
3日目	34,002,413	10,148,551	44,150,964
合計	100,361,811	54,925,304	155,287,115

G空間EXPO2015期間のBLEタグ検出回数を4に示す。3日間を通して、参加者に配布したBLEタグは100,361,811レコード、展示ブースに設置したBLEタグは54,925,304レコード、合計で155,287,115レコードを収集した。

合宿研究会の4日間で収集したBLEタグデータは330Mbyteあった。ひとつのBLEタグについて検出できたadvertising packetは1分あたり0-3レコードだったため、収集できたレコード数が少なく、位置推定に用いることが難しかった。本実験では受信機を改良し、advertising packetの受信性能を向上させたため、42.58Gbyteのデータを収集することができた。ひとつのBLEタグで1秒あたり2-3レコードが検出できており、予定した位置推定を行うに十分な量のデータを得た。次項から本データを使って行った位置推定の結果を述べる。

3.3.2 参加者ごとのBLEタグデータ

参加者一名が持っていたNordic Semiconductor社のBLEタグデータについて、各受信機の検出結果を図3.5に示す。該当の参加者は11/28 14:32から17:54の時間帯に見学しており、図3.5を含む16台の受信機で検出された。図では各受信機で検出した電波強度について5秒ごとの平均値を点、最大値と最小値の差分を灰色の面で示している。該当のBLEタグを一度に受信する受信機は多く、-80dBm以上の電波強度でも7台以上で検出されていた。しかし、電波強度の値は受信機ごとに異なっており、受信機2、3が-70dBmから-60dBm程度の電波強度を検出することがあったが、受信機11、13では-90dBmから-80dBmが検出されている。そのため、該当参加者の周辺の受信機と、遠くに設置された受信機の区別はつけやすいと考えた。

一方で、平均値の時系列での電波強度は安定せず、10分間隔でも電波強度が-10dBm近く変動し、マルチフェージングが大きく表れていることがわかる。しかし5秒間隔での電波強度の変動を確認したところ、この変動は短時間では生じていなかった。図3.5中の灰色面が大きいほど、最大値と最小値の差分が大きく検出した電波強度が変動すると思われるが、5秒おきの電波強度では最大値と最小値の差分はあまり見られず、受信機2、5、9で最小値側への変動が見られたのみだった。そのため本報告で

は、時間間隔5秒おきでの電波強度のカーネル密度推定を行い、電波強度分布を比較し、位置推定を行うこととした。

3.3.3 BLEタグ配布モデルの検討

(a) N点測位方式の適用

合宿研究会の三点測位方式を拡張し、N点測位方式を用いて収集データから参加者の位置推定を行った。参加者がブース16にいた際の位置推定結果を図3.6に示す。はじめに式9から、各受信機で受信する電波強度を距離に変換した。図3.6中の薄色の円で示したエリアは、その距離から参加者がいると推定される位置のエリアを示している。円が重なるほど参加者の位置である可能性が高いと考えられる。展示ブースのスペースには17台の受信機を設置しており、同時に10台ほどの受信機で受信をしている。参加者のもつ配布ビーコンから距離が離れている受信機であっても、強い電波強度が観測されるときがあり、算出した距離にも変化が生じた。これはマルチパスによる影響と考えられ、本実験で得られたデータを用いてのN点測位による位置の推定は難しいとわかった。

(b) フィンガープリント方式の適用

次にカルバックライブラー情報量(kld)を使った最尤推定を用いて、フィンガープリント方式での位置推定を試みた。フィンガープリントは図3.7に示す71ヶ所にBLEタグを置き、180秒間観測した電波強度から作成した。この電波強度は71個のBLEタグを各ブースに設置された机の上に置き、全受信機で検出した電波強度の平均値を使用している。また、会期中に名札にBLEタグを入れ1-32までのブース位置を180秒ずつ訪問し、正解データを取得した。このとき各受信機で検出された電波強度分布をテストデータとした。

図3.8にブース16にいた際に検出されたテストデータと、同ブースで取得したフィンガープリントについて、それぞれの電波強度のカーネル密度推定を示す。図3.8中の破線はフィンガープリントの電波強度分布を示し、実線はテストデータの電波強度分布を示している。フィンガープリントの電波強度は15台の受信機で検出されたが、テストデータの電波強度は13台の受信機で検出されていた。フィンガープリ

ントデータ、テストデータともに検出した受信機であつても、受信機8のように確率密度が最大となる

電波強度がほぼ一致する受信機(受信機8、10、12、

13、14、22)と、一致しない受信機(受信機7、9、11、15、16、17、18)がみられた。収集したフィンガープリントのデータを式2に当てはめ、テストデータの電波強度の確率分布Pと、フィンガープリントから作成

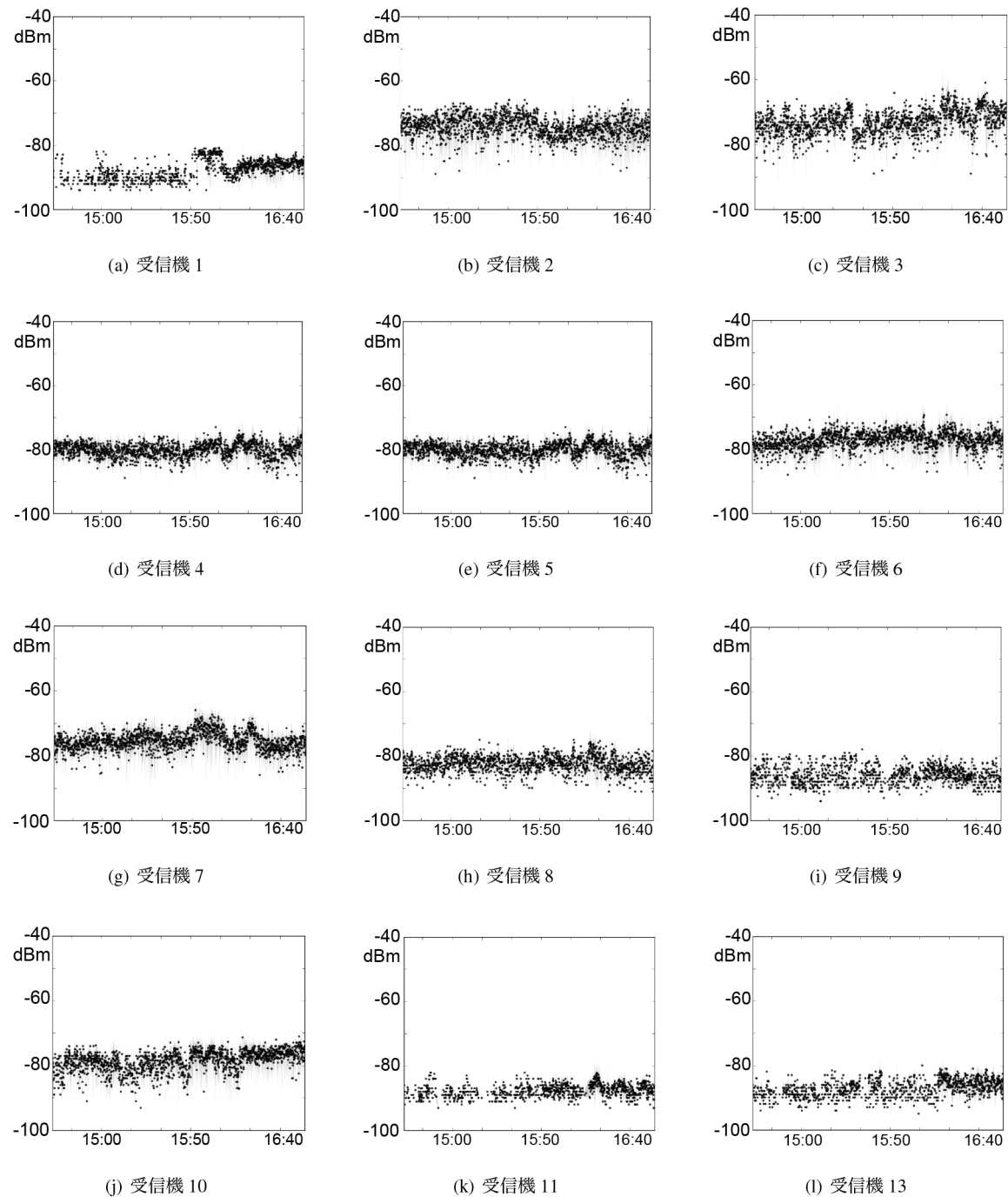


図3.5 参加者のBLEタグデータ

した会場内ブースの電波強度の確率分布Qを各ブースごとに比較し、kldの値Dが最小となるブースを訪問ブースとして推定した。ただし、iをフィンガープリントの取得位置とする。

$$D(P \parallel Q) = P(i) \log_2 \frac{P(i)}{Q(i)} \quad (2)$$

参加者がブース11下側とブース16にいた際のDの値を図3.9に示す。図3.9 (a)は参加者がブース16にいた際の電波強度から算出したDを表す。このとき、Dが最小値となったのはブース16ではなく、ブース29だった。推定されたブース29はブース11の付近に位置している。しかし、図3.9 (b)では、参加者がブース11下側にいたものの、離れた位置にある休憩スペースにいるものとして推定された。ブース11下側のDと休憩スペースのDは近い値で算出されており、より値が小さい休憩スペースが位置として推定されている。図3.8に示すように、テストデータとフィンガープリントでは検出できる受信機の数が異なっており、電波強度分布の最尤推定に影響し、正しく推定できない場合があると考えられる。

(c)環境情報の適用

フィンガープリント方式を用いて、電波強度や受信機の設置位置から重み付けを行い、式2を用いてDを算出した。算出されたkldが小さい値となったブースを推定位置とし、テストデータを収集したブースと一致した割合を算出した結果を表3.6に示す。はじめに、実験当日にお持ち帰りシートに利用した、フィ

ンガープリントの平均値を用いて重み付けなしに推定する手法の精度を算出した。このとき、Dが最小になった展示ブースとテストデータのブースが一致した割合は60.9%となった。一致しなかった39.1%には図3.9 (b)で述べたように、実際の訪問ブースと推定したブースが異なった結果を示している。しかし、Dの値が小さくなった展示ブースを5つ算出したとき、その中に実際の訪問ブースが含まれる割合は93.5%まで上がった。重み付けをせず、フィンガープリントの最頻値を使用した場合は平均値を使用した場合より低い精度となった。

次に、環境情報として電波強度を用いて重み付けを行った際の位置推定精度について述べる。具体的な重み付けとして、以下の3通りを算出した。

① 距離に応じた重み付け: テストデータとフィンガープリントそれぞれの電波強度から式1を用いて、受信機からBLEタグまでの距離dを算出した。その距離が10m以内であると推定された場合、10m以内に設置してある受信機のみを用い、5m以内であると推定された場合、5m以内の受信機のみを用いてkldを算出し、その推定精度を求めた。このとき、10m以内で60.9%、5m以内で65.2%と精度の向上が見られるが、平均値を用いた重み付けなしの際の精度とほぼ変わらない精度となった。

② 電波強度に応じた重み付け: フィンガープリントの平均値に重み付けとして、電波強度の逆数をかけkldを算出した場合、10m以内で54.3%、5m以内で

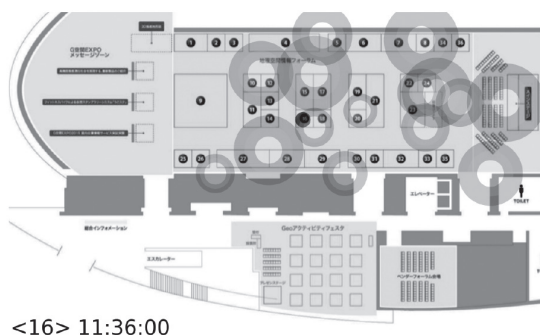


図3.6 N点測位方式を用いた位置推定

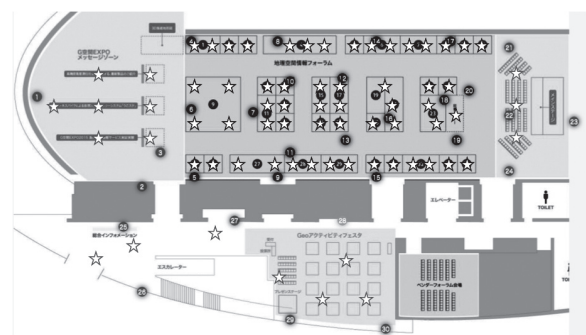


図3.7 フィンガープリントデータの収集位置

52.2%であり、当日の推定手法より低い精度となった。また、フィンガープリントの最頻値を用いた場合、推定精度に大幅な低下が見られた。

③ 受信機の設置位置に応じた重み付け:最後に、環境情報として受信機の設置位置を考慮して重み付けを行った際の位置推定精度について述べる。受信機の設置位置を、最近傍の受信機、正面側の受信機の2つ

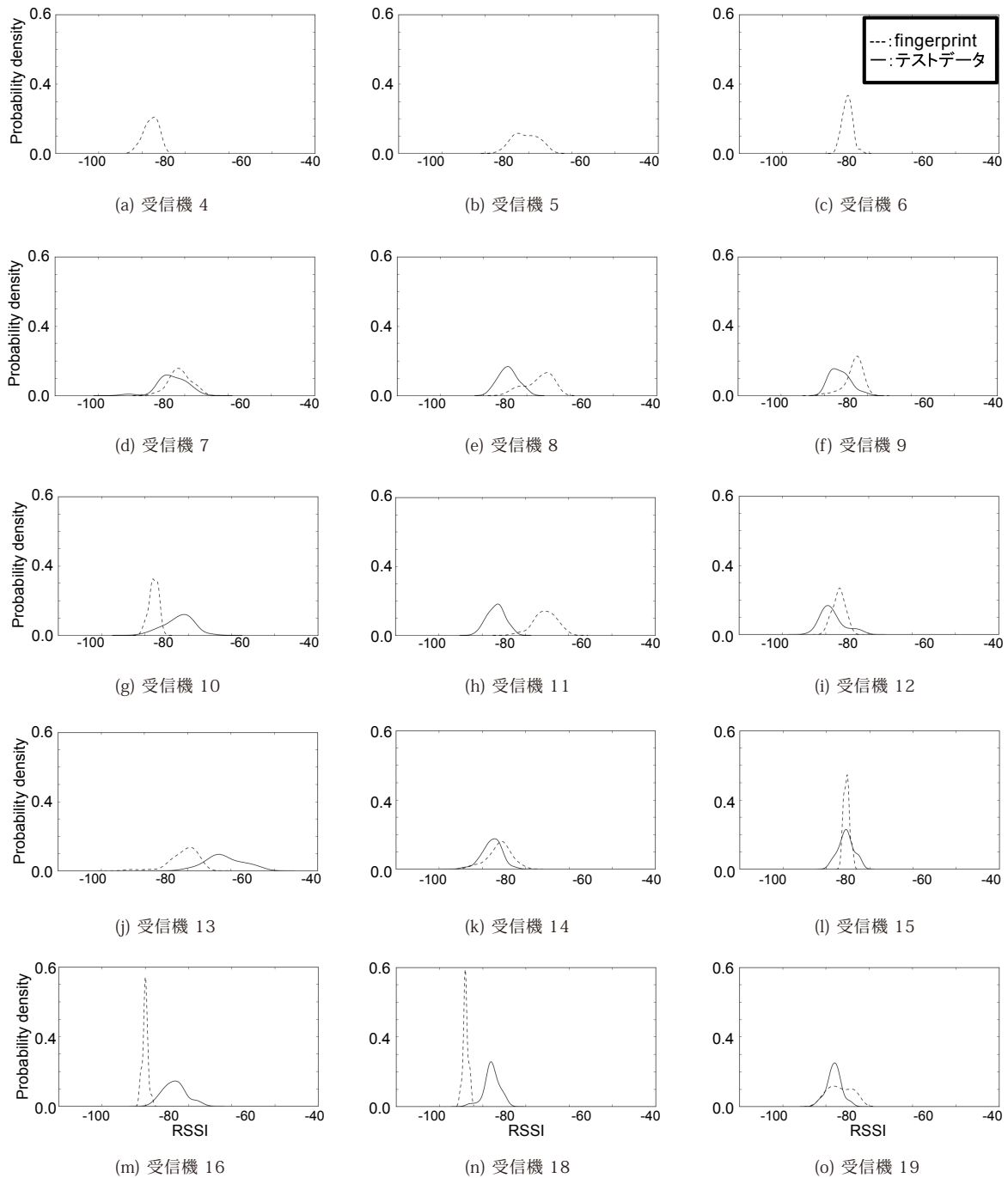


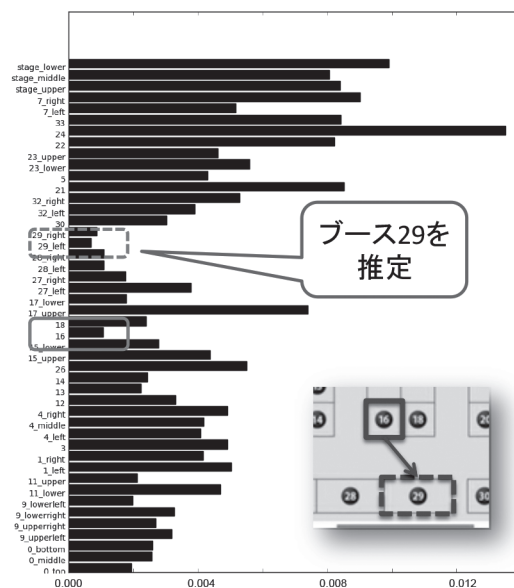
図3.8 電波強度のカーネル密度推定比較

の条件で分類した。最近傍の受信機は、フィンガープリントを収集した展示ブースの最近傍にある3受信機とした。正面側の受信機は、参加者が展示ブースに滞在する際、展示ブースのパネルのある方向を向くことを考慮した。参加者の背中側となる受信機のうち、10m以上離れて設置している受信機での電波強度を同時刻に受信した全受信機の電波強度の最小値と同

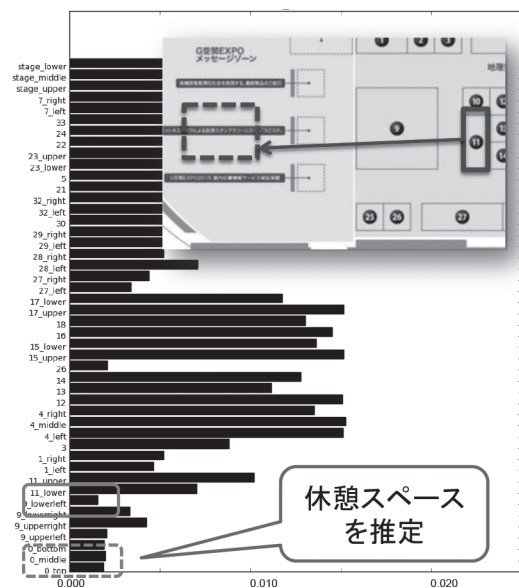
等の値に変換し、参加者の正面側に設置された受信機での電波強度は変換せず用いた。その結果、最近傍の受信機、正面側の受信機に重み付けを行った場合ともに、推定ブースと実際の展示ブースが一致した割合は、73.9%となり、当日の推定手法より向上が確認できた。また、Dが小さい値となった5つのブースと実際のブースが一致した割合は、それぞれ、95.7%、

表3-6 位置推定の精度評価

重み付けの対象	フィンガープリント	推定ブースとテストデータのブースが一致した割合 (%)				
		1つ	2つ	3つ	4つ	5つ
なし (実験当日のお持ち帰りシートに使用)	平均値	60.9	76.1	89.1	89.1	93.5
なし	最頻値	39.1	56.5	71.7	73.9	80.4
① テストデータ (10m 以内)	平均値	60.9	78.3	87.0	93.5	95.7
① テストデータ (5m 以内)	平均値	65.2	73.9	80.4	89.1	93.5
① テストデータ (10m 以内)	最頻値	43.5	65.2	73.9	82.6	84.8
① テストデータ (5m 以内)	最頻値	39.1	58.7	69.6	76.1	80.4
② フィンガープリント (10m 以内)	平均値	54.3	73.9	84.8	87.0	93.5
② フィンガープリント (5m 以内)	平均値	52.2	69.9	76.1	84.8	93.5
② フィンガープリント (10m 以内)	最頻値	39.1	54.3	71.7	76.1	78.3
② フィンガープリント (5m 以内)	最頻値	37.0	50.0	65.2	73.9	76.1
③ フィンガープリント (最近傍の受信機)	平均値	73.9	89.1	95.7	98.7	95.7
③ フィンガープリント (正面側の受信機)	平均値	73.9	89.1	93.5	95.7	97.8



(a) ブース 16



(b) ブース 11 下側

図3.9 算出したkldの値(重み付けなし)

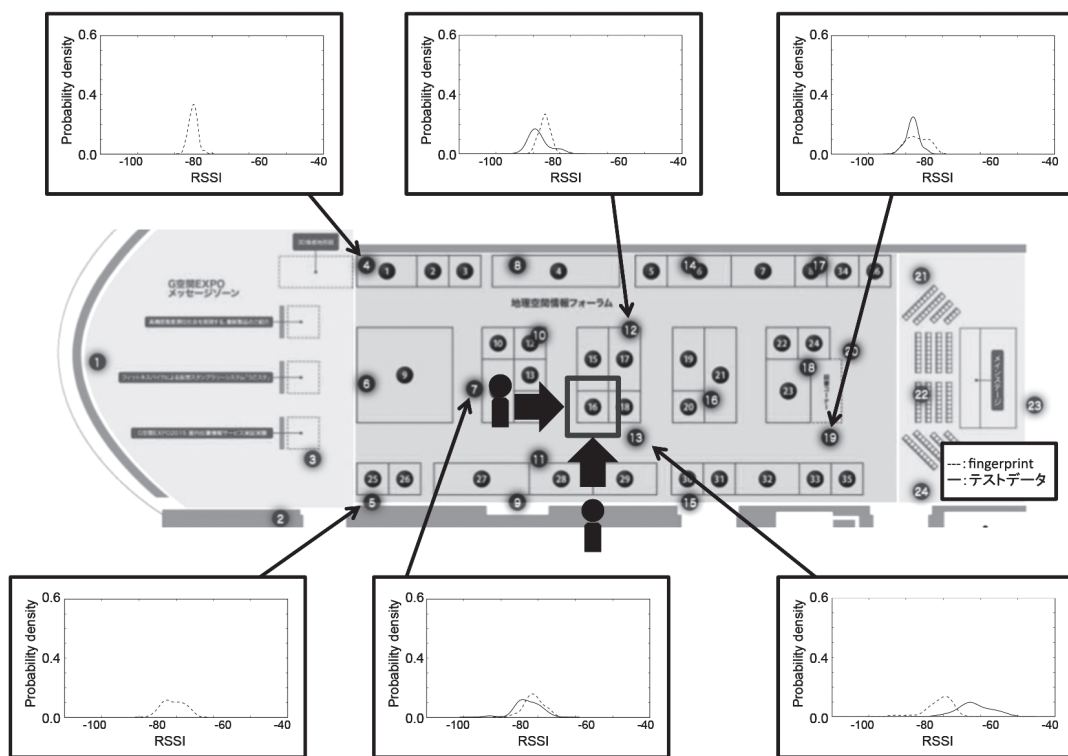


図3.10 参加者の向きと電波強度分布の比較

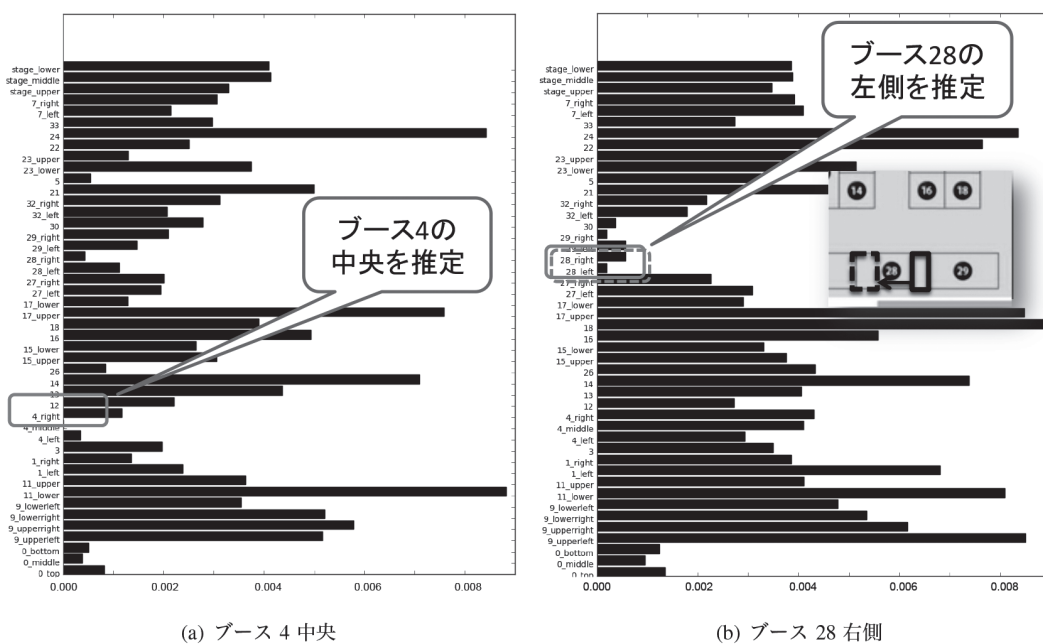


図3.11 算出したkldの値(重み付けあり)

97.8%となった。

正面側の受信機に重み付けを行った推定手法で最も良い精度が得られた理由として、展示ブース滞在中の参加者の向きと電波強度の分布が考えられる。図3.10は参加者の向きと電波強度分布の比較した図であり、参加者は展示ブースを滞在している間、パネルにあるポスターや展示機材を見学していると考えられる。BLEタグは名札に入れ配布しているため、常に参加者の胸の位置にある。そのため、参加者から見て正面側に設置されている受信機では、遠くの受信機であってもBLEタグのadvertising packetをよく検出しており、テストデータとフィンガープリントが電波強度分布を比較することができる。しかし、参加者の背中側にあり、訪問ブースから離れた場所に設置されている受信機では、フィンガープリントのadvertising packetは検出しているが、テストデータのadvertising packetを検出することができていない。これは、フィンガープリントを展示ブースの机に置き収集していたが、実際の参加者の動きは固定的であり、常にパネル側を向いていたため背中側となる受信機にadvertising packetが到達しなかったと考えられる。

正面側の受信機に重み付けを行った推定手法でのDの値を比較する。参加者がブース4中央とブース28右側にいた際のDの値を図3.11に示す。図3.11 (a)は参加者がブース4中央にいた際の電波強度から算図16：ハイブリッドPDRによる移動経路推定出したDを表しており、ブース4中央のDが最小値となり、テストデー

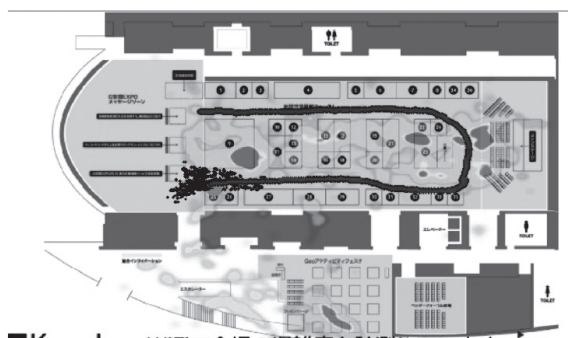


図3.12 ハイブリッドPDRによる移動経路推定

タの正解位置として正しく推定された。また、図3.11 (b)では、参加者はブース28右側におり、最小値として推定されたのは隣り合った位置にあるブース28左側のブースだった。他ブースの推定においても、誤って推定されたブースはすべてテストデータの正解ブースの近隣となっていた。

3.3.4 ハイブリッドPDRデータを用いた移動経路推定と正解データの作成

本実験では、BLEタグとAndroid端末を配布し搭載されたセンサのデータを収集するとともに、レーザを設置するなど様々なデータを収集した。今後、これらのデータを組み合わせて分析に用いることで、位置推定の精度向上や移動軌跡推定への活用を図る。例として、BLEタグから得られた電波強度と加速度の値を用いた移動軌跡推定、ハイブリッドPDRデータとBLEを用いた移動軌跡推定、レーザデータの正解データとして利用などが考えられる。本項では、ハイブリッドPDRを用いた移動軌跡推定とレーザを用いた正解データの作成について処理状況を述べる。

(a) 移動軌跡推定

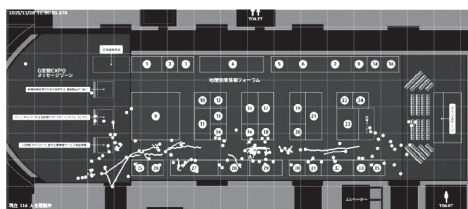
Android端末を用いて会場内を歩行し、収集した加速度、角速度のデータを用いて、移動経路の推定を行った。Android端末を腰位置に固定し、図3.12の実験参加受付前をスタート地点として会場内を時計回りに一周した。推定結果を図3.12に示す[43]。

(b) 正解データの生成

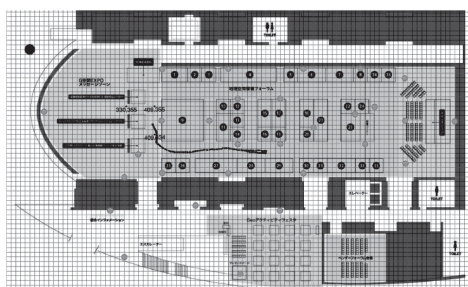
レーザデータを用いて、移動経路推定をした際の正解データを作成した。レーザデータは赤外線を利用しており、図3.13 (a)に示すように設置したセンサ周辺の歩行者の軌跡を高精度に検出する。検出した歩行者の軌跡から、実験の参加者を区別し、正解データとした作成した。Android端末を配布した参加者の実験開始時刻や実験終了時刻と、受付付近で観測されたレーザデータを比較し、同時刻に観測された歩行者を参加者として特定した。なお、Android端末を配布した参加者に対し、実験開始前に行ったキャリブレーションは特定の地点で行っているため、受付付近で複数の歩行者が観測されていた場合に判別す

ることが可能であった。

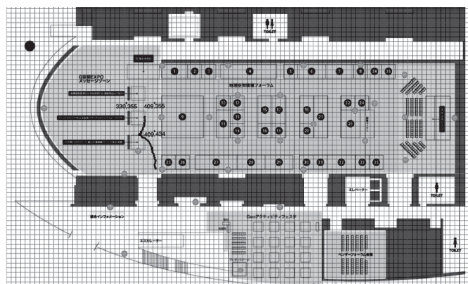
作成した正解データの例を図3.13 (b)、図3.13 (c)に示す。図3.13 (b)は実験開始時刻のレーザデータを利用して判別した参加者の軌跡であり、見学を開始し、受付から展示ブース会場に向かって進んでいく軌跡が得られた。図3.13 (c)は実験終了時刻のレーザデータを利用して判別した。受付でAndroid端末を返却し、会場の出入り口から外へ向かって歩いていく軌跡が得られた。実験開始と終了の時刻で参加者を特定することで、Android端末を配布した参加者について正解データを得ることができた。



(a) レーザで観測された会場の歩行者 (日立情報通信エンジニアリング提供)



(b) 正解データの例 (実験開始時)



(c) 正解データの例 (実験終了時)

図3.13 レーザを用いた正解データの作成

3.4 考察

本実験では、大規模イベント環境でのビーコン配布モデルの検証および、ハイブリッドPDRをはじめとする位置情報の収集を目的として実験を行った。BLEタグデータ収集環境については大きな改善がみられ、IoTデバイスを用いた位置推定の検証を行うことができた。ハイブリッドPDRをはじめとする位置情報についても、当初の目的通り収集できた。

第4章 まとめと将来展望

本年度は、大規模イベントでIoTデバイスを用いた2件の実験を行った。目的としていた、BLEタグデータ収集環境の構築とBLEタグデータ、ハイブリッドPDRデータの収集を達成し、BLEタグデータを用いた位置推定を試行した。今後は、BLEタグデータ、ハイブリッドPDRデータなど複数の技術やデータを組み合わせた分析を進め、推定精度の向上を目指す。

WIDEでは「右手に研究、左手に運用」の標語の下に、実際のネットワーク運用やテストベッド開発を行ってきた。IoTの時代には、今回のような実証実験などを通じた「実世界データ収集・分析」も重要な研究・運用の一部とみなす必要がある。実世界データ収集は大きな労力を伴うため、WIDEのような組織を挙げての協力が必要である。今後も、様々なIoTデータ収集にチャレンジしていきたいので、ぜひ協力をお願いしたい。また、実証実験を通じた実世界データ収集のチャンスがあれば、ぜひお声がけ頂きたい。