

スマートフォンを持つ歩行観測者による Range-Only SLAMを用いたBLEビーコン位置推定手法

佐藤 章博^{1,a)} 中島 円¹ 神武 直彦¹

受付日 2020年4月6日, 採録日 2020年10月6日

概要: 本論文では, 屋内空間に配置された Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンの位置座標を, スマートフォンを所持した人が周囲を歩行して収集した Received Signal Strength (RSS) によって推定する手法を提案する. 提案手法では, Range-Only Simultaneous Localization and Mapping (RO-SLAM) によって, スマートフォンと BLE ビーコンの位置を同時に推定する. これにより, 座標が既知の歩行ルートを用いる必要がない. また, 複数仮説追跡を用いることで, 方向情報を直接観測しない RO-SLAM においても少ない RSS 観測数で推定値を得ることができ, データ収集時間を短縮できる. さらに, 位置座標の推定対象に, BLE ビーコン 2 個を 1 組として間隔が既知のツインビーコンを用いて, 追跡する仮説数を削減し, 推定に要する計算負荷を抑制することを可能にする. 実環境実験を通じて, 提案手法では 8 個 4 組のツインビーコンの設置座標を, 90 秒の観測を用いて平均誤差 2.14 m で推定できることを確認した.

キーワード: 屋内位置推定, BLE ビーコン, SLAM, EKF, 複数仮説追跡

A BLE Beacon Localization Method Using Range-Only SLAM by Walking Observer with Smartphone

AKIHIRO SATO^{1,a)} MADOKA NAKAJIMA¹ NAOHIKO KOHTAKE¹

Received: April 6, 2020, Accepted: October 6, 2020

Abstract: This paper proposes a method to estimate the location coordinates of Bluetooth Low Energy (BLE) beacons placed in the indoor space using Received Signal Strength (RSS) collected by a person walking around with a smartphone. The proposed method estimates the positions of the BLE beacons and smartphone in same time by Range-Only Simultaneous Localization and Mapping (RO-SLAM), with no requirement of predefined trajectory of the walking route. Multiple hypotheses tracking is employed to obtain the estimation in a brief RSS survey despite the lack of angular information on the sensor in RO-SLAM. The target BLE beacons to estimate the location coordinates are twin beacons with the relative distances known in advance, that enables to suppress the number of hypotheses to track and consequently the computational load. As the result of experimental evaluation using 8 (4 pairs) of twin beacons, the proposed method could obtain the estimated coordinates by a survey in 90 seconds. The mean estimation error is 2.14 m.

Keywords: indoor location estimation, BLE beacon, SLAM, EKF, multiple hypotheses tracking

1. はじめに

近年, 屋内空間を対象とした位置情報サービスが注目されているが, 屋内空間の利用形態の中で, レイアウトや物

体配置を頻繁に更新することを想定した使い方があある. たとえば展示会や博覧会のためのイベント会場などのように, 多目的に空間を利用することを前提とする場合は, 柱や間仕切りなどのない開放的な屋内空間をあらかじめ用意したうえで, 目的に応じた空間配置となるように移動可能な物体を配置することが一般的である. また, 工事実施中の区画などにおいて, 継続して人の動線を確保するために通路

¹ 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Graduate School of System Design and Management,
Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8526, Japan

a) akihiro.sato@keio.jp

を仮設する場合は、一時的に異なる形状の通路が存在することになる。このような屋内空間における位置情報サービスの提供 [1] は、来訪者にとって目新しい更新後の屋内環境に対して、歩行者ナビゲーションや、位置に基づいた施設情報の配信などが実現されることで、有用になると考えられる。

一方で、屋内では全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System: GNSS) の電波信号が届きにくくなるため、位置情報サービスの実現のために GNSS に代わる屋内測位システムを構築することが必要である [2]。屋内環境の変更が発生するとき、屋内測位に用いるデバイスの設置・回収や、キャリブレーションあるいは環境モデリングのための計測 [3] などの事前準備が、選択する屋内位置推定手法の種類に応じて必要となる。屋内測位を利用可能にするまでの準備期間はなるべく短くできることが望ましく、事前準備の作業は容易に実施できることが求められる。第 5 世代移動通信システム (5G) の普及にとともに、その高速大容量な通信速度を活かして屋内地図を必要に応じてダウンロードできる、場所に応じた屋内位置情報サービスを展開することが容易になっていくことが想定でき、さまざまな屋内環境に対して屋内測位システム構築の省力化を考慮することは今後重要になっていくと考えることができる。

そこで本研究では、屋内測位に用いるための Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンを密に設置した屋内空間を対象として、スマートフォンを所持した人が対象空間内を歩行するという単純な動作により収集した観測データを用いて、BLE ビーコンの位置座標を推定する手法を提案する。自己位置と環境地図の同時推定 (Simultaneous Localization and Mapping: SLAM) を、レーザスキャナやカメラなどの方向を検知するセンサを用いずに距離のセンシングから行う手法は、Range-Only SLAM (RO-SLAM) [4], [5] と呼ばれている。提案手法では、BLE ビーコンとスマートフォンの間の距離に関連する受信信号強度 (Received Signal Strength: RSS) のみを観測データに用いて、RO-SLAM をもとに次の 3 点の実現を目標とした推定アルゴリズムで、BLE ビーコンとスマートフォンの位置を同時推定する。

- (a) スマートフォンを所持した人の歩行ルートについて、座標は歩行開始前には未知である。座標が既知の歩行ルートを用いる必要がない。
- (b) 作業をすみやかに完了させるため、RSS 観測データを収集するための歩行時間を少なくする。
- (c) リアルタイムに推定結果を表示し作業進捗を明らかにするため、RSS 観測データから BLE ビーコンの位置座標を推定するための計算負荷を少なくする。

提案手法を評価するために、実際の屋内空間に、座標が未知の BLE ビーコンを 8 個、座標が既知の BLE ビーコンを 4 個設置し、スマートフォンを用いた実験を行った。そ

の結果、電波信号の反射や干渉の影響で BLE ビーコンの RSS が不安定な時間変化を生じる [6] 状況下においても、提案手法により座標が未知の BLE ビーコンに対して設置座標の推定が可能となり、90 秒間の観測を用いた場合の平均推定誤差が 2.14 m となったことを確認した。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2 章で対象とする屋内測位環境と研究課題について述べる。3 章で RO-SLAM における関連研究を紹介し、4 章で提案手法の詳細を説明する。5 章において提案手法を実験により評価し、6 章で考察を行う。最後に 7 章で本論文をまとめる。

2. 研究課題

2.1 屋内測位環境のコンセプト

本研究では、位置推定を数 m 以内の精度で可能にする測位環境を構築するために、信号検知範囲が 10 m 以内の BLE ビーコンを密に配置することを想定する。BLE ビーコンを測位対象の空間を網羅するように設置し、その位置座標の情報があれば、Proximity もしくは Triangulation [7] などの手法により、絶対位置からの測位が可能である。そのため、Fingerprinting [6] にみられるような、屋内環境に依存して事前の作業が発生する電波環境マップの作成は必要としない。

BLE ビーコンは、低消費電力なため内蔵電池で数カ月以上駆動可能であり、かつパッケージの小型化が可能なことから、屋内の電気配線に縛られずに柔軟に設置することができるため、屋内のさまざまな物体を BLE ビーコンの設置対象に考えることができる。一方で、天井への BLE ビーコンの設置は、多くの場合で人の手が届くより高い場所での作業をともなう。そこで、必要な位置推定の精度を達成するため、移動可能な物体を設置対象として積極的に利用する。

本研究では、より多くの BLE ビーコン製品を利用可能な対象とできるよう、Bluetooth 4.x 準拠の BLE ビーコンを用いることとする。すなわち、BLE ビーコンから BLE 受信機に向けたブロードキャストの片方向のみの信号伝達を想定する。

2.2 BLE ビーコンの位置推定

前節で述べたような BLE ビーコンの設置座標を簡便に計測できる方法があれば、想定する屋内測位環境の構築作業が容易になることが期待できる。BLE ビーコンの設置座標を計測するアプローチには、屋内地図から求める手段 [8] の例があるが、屋内地図に移動可能な物体をつねに最新の位置で記載することは、地図作成作業にとって負担となる。そこで、実際の屋内環境で BLE ビーコンの信号を観測することで位置座標を推定する手法に着目し、信号の受信機として入手が容易なスマートフォンを用いることを検討する。

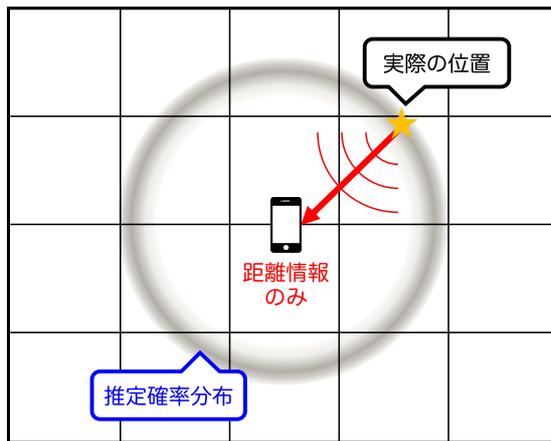


図 1 検出時の BLE ビーコン位置の推定確率分布

Fig. 1 The estimated probability distribution of BLE beacon location at the time of detection.

ワイヤレスセンサネットワーク (WSN) のノード位置推定の問題に対しては、疎に配置された座標が既知のアンカーノードを用いて、位置が不明な固定ノードの座標を各ノード間の距離情報をもとに測位サーバで一括して推定する手法が研究されている [9], [10]。しかし、BLE ビーコンがマルチホップ通信に対応しない前提では、取得した距離情報を BLE ビーコンにより 1 カ所の測位サーバに集約することができない。一方で、無線信号の受信機が移動すれば、対象とするすべての BLE ビーコンについて信号の観測データを収集することが可能である。移動端末で無線 LAN 基地局の信号を収集し、基地局の位置を求める War Driving と呼ばれる手法 [11] があるが、War Driving は GNSS などから移動端末の位置を手でできることを前提としている。そこで、本研究においてはこれらの手法とは異なる推定アプローチが求められる。

2.3 研究課題と本論文の貢献

本研究では、対象の屋内空間において、GNSS による測位が利用できず、移動端末の位置を得る手段を用意する必要がある状況を考える。そこで、RO-SLAM により BLE ビーコンとスマートフォンの位置の同時推定を行うことで、1 章であげた目標 (a) を実現する。絶対測位の問題を解決するために、BLE ビーコンの一部は事前に位置座標を別の方法で測定しておくものとするが、その割合は全体の 1/3 以下にすることを旨とする。

RO-SLAM では、BLE ビーコンが検出されたとき、その方向情報が不明なことから、スマートフォンに対する位置は観測した RSS に基づく距離推定を用いて図 1 に示すように 2D 平面上で同心円状の確率分布で推定される。そのため、単一の推定フィルタによる RO-SLAM [12] では、推定対象の位置の初期化精度が不十分となり、収束した推定値を得るために多くの RSS データを移動して集めなければならないという課題が存在する。

提案手法では、推定対象の位置の確率密度分布を混合ガウス分布で近似したうえでそれぞれのガウス分布を位置の仮説と見なし、複数仮説追跡 (Multiple Hypotheses Tracking: MHT) [13], [14] を用いて各仮説を個別の拡張カルマンフィルタ (Extended Kalman Filter: EKF) で追跡する。仮説の一部が比較的精度の高い初期値を有することで、短い観測時間で推定値を得ることが可能となり、目標 (b) の実現が期待できる。本研究では、50m 四方の領域の BLE ビーコンの位置座標を 40 分で取得するシナリオを想定し、10m 四方に配置された BLE ビーコンに対するデータ収集時間の目標値を 90 秒とする。

しかしながら、複数の推定対象の位置を追跡するための仮説としては、個々の推定対象の各仮説のすべての組み合わせが生成される。円周状に分布した仮説を推定対象のすべてに用いると、追跡対象の EKF の数は、推定対象の数とともに指数関数的に増加してしまい、計算量の増加を招いてしまう。したがって、目標 (c) のリアルタイムな推定の実現にはアルゴリズムの軽量化が求められる。そこで本研究では、屋内空間に配置する BLE ビーコンに、間隔が既知の 2 個 1 組の BLE ビーコンを 1 ユニットとしたツインビーコンを用いることを提案する。一方の BLE ビーコンの位置を円周状に分布した仮説で近似したうえで、他方の位置は、ビーコン間の距離を用いて求める点から仮説を作り近似することで、生成される追跡対象の EKF の数を抑制することができる。

本論文における主な貢献は、以下の 3 点である。

- 推定時間と計算負荷を考慮した Range-Only SLAM アルゴリズムを用いた、スマートフォンを持つ歩行観測者による BLE ビーコン位置推定手法の提案を行った。
- 屋内空間において BLE ビーコンとスマートフォンの実機を用いた実験を行い、座標が未知の歩行ルートによる観測から BLE ビーコンの位置推定が可能なることを確認した。
- ツインビーコンが推定アルゴリズムで扱う仮説数の抑制に寄与することを示し、位置推定精度、推定時間の観点で提案手法を評価した。

3. 関連研究

本研究においては、リアルタイムに静止ビーコンと移動端末の位置の同時推定を行う逐次 RO-SLAM が重要な役割を果たす。RO-SLAM に関する研究は、これまで車輪型移動ロボット [4], [5], [12], [15], 無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) [16], [17], 自律型無人潜水機 [18] における検討が主であった。リアルタイムな推定には、ベイジアンフィルタが用いられることが一般的である。本章では、ベイジアンフィルタの状態ベクトルを構成する、推定対象の位置座標の初期化方法に関連する研究について述べ、本研究の利用環境における RO-SLAM に関する課題に

ついて分析する。

3.1 Delayed Initialization

Menegatti ら [12] は、868 MHz 電波ビーコンと車輪型移動ロボットに対して、RSS 観測データとロボットのオドメトリを単一の EKF で密に結合することで位置の同時推定を行った。ビーコンの位置は、ロボットが異なる場所から複数回 RSS を観測し、Triangulation で推定することで初期化される。EKF による SLAM が対象ビーコン位置の推定を開始するまでに、初期値を得るための時間分の遅延が生じるため、初期化方法は Delayed Initialization として分類される。ビーコン位置の初期化には、格子位置推定を利用した研究 [15], [18] もある。

Delayed Initialization では、初期化に用いる距離情報を観測する移動端末の位置は判明している必要がある。したがって、移動端末の自律航法に用いるセンサ情報の精度が低い、または移動端末の軌跡を得る手段が存在しない場合は、推定対象の位置座標について良好な精度の初期値を得ることが難しくなり、Delayed Initialization は十分に機能を果たすことができない。

3.2 Undelayed Initialization

距離情報の検出と同時に対象の位置座標の推定を SLAM の中で開始する方法は、Undelayed Initialization として分類される。Seco ら [19] は、Radio Frequency Identifier (RFID) ビーコンと、RFID 受信機を持った歩行者に対して、RSS 観測データを用いて FastSLAM [20] により位置の同時推定を行った。利用シナリオとして、歩行者の持つ端末がバックグラウンドで RSS を収集することで、ビーコンの設置座標を求めることを想定しているが、領域内のランダムな位置の座標を用いてビーコン位置の初期化をしている。このアプローチでは、ビーコン位置の推定は検出と同時に FastSLAM で扱われるものの、初期値の精度は必ずしも高くない。そのため、推定値が収束するのに十分な量の RSS データを収集するためには時間がかかる。報告では、合計約 100 分の観測を要して、65 × 40 m の領域にある 60 個のビーコンに対し中央値 2.3 m の精度で位置座標を求めている。

一方で、距離情報のみから求められる推定対象の位置の確率密度分布を、マルチモーダルな分布で表現して即座に SLAM のためのベイジアンフィルタに組み入れ、遅延なしに推定を開始するアプローチが存在する。Blanco ら [4] は、Ultra Wide Band (UWB) ビーコンと車輪型移動ロボットに対する位置の同時推定において、ビーコン位置の確率密度分布をパーティクルで表現し、初めから SLAM でビーコン位置を扱う手法を提案した。ロボット位置もパーティクルフィルタで推定しているが、その個々のパーティクルそれぞれがビーコン位置を表現するパーティクルを含む形で

初期化される。このことにより、SLAM アルゴリズムの中で検出直後のビーコンが共存できるようになる。ビーコン位置がおおむね 1 点に収束したと見なされるとパーティクルはガウス分布に置き換えられ、以降の推定アルゴリズムは FastSLAM に準じたものとなる。この手法を Blanco ら [5] はさらに改良し、ビーコン位置の確率密度分布を混合ガウス分布で表現し、EKF による複数仮説追跡を用いることで、パーティクルで確率密度分布を表現する場合に対して計算負荷の軽減をはかっている。

Fabresse ら [16], [17] は、混合ガウス分布を用いた複数仮説追跡 EKF-SLAM による、2.4 GHz 帯電波ビーコンと UAV の 3D 位置の同時推定において、球状の確率密度分布を表現する混合ガウス分布に工夫を行い、仮説数を低減させる手法を提案した。トロイド状の確率密度分布の仮説を、方位角方向と高度角方向のそれぞれに複数用意し、各方向を個別に推定する手法により、1 つのビーコンに用いる仮説の数を、方位角および高度角方向の仮説数の積から和に減らすことができる。しかし、はじめから方位角方向の仮説のみが存在する 2D の位置推定ではこの手法で仮説数を低減させることができない。

3.3 本研究の利用環境における課題

本研究では、移動端末としてスマートフォンを考え、所持した人の歩行により移動するという想定をしている。歩行軌跡を得る手段として、スマートフォンに搭載されるセンサによる歩行者自律航法 (Pedestrian Dead Reckoning: PDR) があるが、その精度は搭載センサの特性および用いられるアルゴリズムに依存する。Delayed Initialization に不利な PDR の精度が低い状況でも、良好な精度の初期化で RO-SLAM を開始し推定値を速く収束させるためには、複数仮説追跡による Undelayed Initialization が適しているといえるが、前述の Fabresse らの研究の手法では次の課題が残っている。まず、絶対測位を行う方法については考慮されていない。次に、UAV の位置は複数仮説追跡 EKF-SLAM の中でユニモーダルな分布として扱われている。PDR の精度が低ければ、スマートフォンの位置推定はビーコン信号に大きく依存する必要があるが、このときスマートフォンはビーコンの仮説ごとに異なる軌跡が考えられるため、スマートフォンの位置をマルチモーダルな分布で扱う必要がある。このためには文献 [13] の方法が必要であるが、位置推定対象の数が増加すると全体の仮説数に組合せ爆発が生じて計算負荷が犠牲となる。計算負荷を減らすために、2D の位置推定においても混合ガウス分布の仮説数を抑制する方法を検討することは重要な課題である。

4. 提案手法

4.1 想定シナリオ

4.1.1 BLE ビーコンの設置方針

本研究では、空間を区切るために物体が配置されており、区切られた空間は人の滞在および通行に利用できる屋内空間を考える。設置する BLE ビーコンの数を増やすことで、目安として 2m から 6m までの配置間隔を目指すために、取り付けやすさを優先して設置場所を選ぶこととし、BLE ビーコンの整然とした配置を実現することは目指さない。測位精度のために最適な配置形状ではなくなるが、BLE ビーコンの数により精度を補うものとする。また、できるだけ見通し内 (Line-Of-Sight: LOS) の信号を受信できるように、人が滞在および通行できる空間に面した場所に BLE ビーコンを設置するものとする。このことにより、空間の区切り以外には、電波信号の反射や遮蔽となる障害物が無いものとする。設置された BLE ビーコンは、屋内測位に用いている間は静止しているものとするが、屋内空間の構成が変更された場合には、空間の形状に合わせて位置が変わるものとする。

4.1.2 ツインビーコンとアンカビーコン

提案手法では、位置推定対象となる BLE ビーコンはすべて 2 個を 1 組として、その間隔が判明している状況を想定する。本研究ではこの 1 組になった BLE ビーコンをツインビーコンと呼ぶことにする。ツインビーコンでは 2 個とも絶対座標については事前には不明であり、間隔が既知という点を除いては通常の BLE ビーコンと変わらない。間隔の情報は提案手法の位置推定アルゴリズムの中で利用可能とする。間隔は事前に何らかの方法で計測されていることになるが、たとえば、机やパーティションボード、看板などの移動可能な物体の両端に BLE ビーコンを取り付ける運用とすれば、その物体の寸法の情報を利用するか、あるいは物体の幅を計測することでツインビーコンの間隔を得ることができる。取り付けの物体の大きさと測位精度の目標値を合わせて考えると、ツインビーコンの間隔は 2m から 4m 程度が現実的になると考える。

また、提案手法では絶対測位の問題を解決するために、低密度に配置された基準とする点で位置座標を得ることができる必要がある。位置座標を得るための手段には、座標値が埋め込まれた QR コードを基準点に設置して撮影する方法、GNSS 受信機で位置座標を含んだ航法メッセージを取得できる IMES 方式 [21] を用いる方法、基準とする点に BLE ビーコンを設置してあらかじめ座標を計測しておく方法などを考えることができる。本研究では、この手段として座標を取得した BLE ビーコンを用い、アンカビーコンと呼ぶことにする。アンカビーコンは屋内測位環境構築時に座標を計測してもよいが、多目的に利用される前提の屋内空間では常設しておけば座標を計測する機会を減らすこ

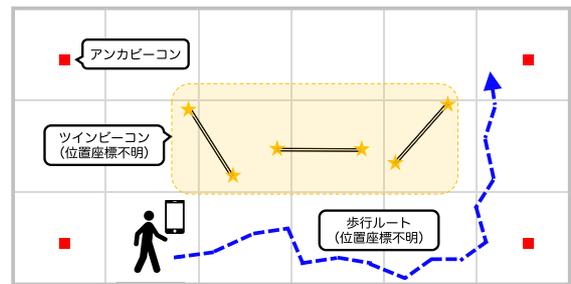


図 2 想定環境における RSS 観測データの収集

Fig. 2 RSS observation data collection in assumed environment.

とができる。アンカビーコンの総数はツインビーコンと比較して少ない状況を考える。また、アンカビーコンどうしは、お互いの電波の届く範囲が重ならない程度に離れているものとする。そのため、アンカビーコンのみを用いて測位を行う場合には、Triangulation, Fingerprinting といった測位手法にかかわらず十分な精度を得ることができない状況を想定する。

4.1.3 RSS 観測データの収集

提案手法では、図 2 に示すようにスマートフォンが BLE ビーコンが設置された領域を移動して BLE ビーコンの信号を受信し、RSS の観測を行う。収集した観測データは、BLE ビーコンとスマートフォンの位置座標を同時に逐次推定するのに用いられる。観測データの収集に用いるスマートフォンは、人 (観測者) が所持して歩行することで移動するものとする。観測者の歩行は、領域内にある 1 つのアンカビーコンの信号が受信できる場所から開始し、すべての位置推定対象のツインビーコンの近傍を複数回通過するような経路をとることで、これらのツインビーコンの RSS をスマートフォン上で収集する。また、観測者はこの間に、位置推定を補正する絶対位置座標を得るために適切な頻度で、アンカビーコンの近傍を通過するものとする。歩行経路については大まかな方針を持って、観測者の判断をとらないながら決めるものとするが、精密に定められた軌跡をとる必要はないものとする。なお、歩行による観測中は、BLE ビーコンは静止しているものとする。

4.1.4 想定する屋内測位システムの特徴

このように設置された BLE ビーコンを用いることで、次のような屋内測位システムの構築が可能となることを想定している。

- イベント開催時などの場合において、会場設営後当日内に屋内測位システムの準備作業が完了する。
- シンプルな Proximity または Triangulation ベースの屋内測位手法ながら数 m 以内の測位精度を有する。
- PDR への依存度を低くする (または、用いない) ことで、スマートフォンの電力消費に優しい。
- プッシュ通知による情報配信を目的として、会場の展

ブースなどに配置した BLE ビーコンを、来場者に対する屋内測位、ナビゲーション用途に兼用する。

- 通路や人の動線に沿って配置した BLE ビーコンの位置から簡易地図を作成し、ナビゲーションに利用する。

4.2 ツインビーコンとスマートフォンの位置の同時推定

提案手法では、位置推定対象の BLE ビーコンとスマートフォンの、二次元平面上での座標を得ることを最終的な目標とするが、BLE ビーコンとスマートフォン、または BLE ビーコンどうしが異なる高さにある場合に対応するため、収集した RSS 観測データを用いて三次元空間の位置座標を推定する。

4.2.1 状態ベクトル

時刻 t の状態ベクトル \mathbf{x}_t は、すべてのツインビーコンとスマートフォンの位置座標で構成され、以下のように表される。

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{m,t} \\ \mathbf{b}_f \end{bmatrix} = [\mathbf{x}_{m,t}, \mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_{N_f}]^T \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{m,t} = [x_t, y_t, z_t]^T$ はスマートフォンの位置座標、 $\mathbf{b}_b = [x_b, y_b, z_b]^T$ は b 番目の BLE ビーコンの位置座標、 N_f は推定対象の BLE ビーコンの個数を表す。

4.2.2 複数仮説追跡を用いた Range-Only SLAM

提案手法では、状態ベクトルの推定値に対し、異なる位置を表す複数の仮説を取り扱うことができるようにする。時刻 t における i 番目の仮説は、平均 $\boldsymbol{\mu}_t^i$ と分散 $\boldsymbol{\Sigma}_t^i$ を持つガウス分布で表される。このとき、状態ベクトルの事後推定値 $\hat{\mathbf{x}}_t$ は、各仮説が w_t^i で重み付けされた混合ガウス分布で表現される。

$$p(\hat{\mathbf{x}}_t) = \sum_{i=1}^{N_{h,t}} w_t^i \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_t^i, \boldsymbol{\Sigma}_t^i) \quad (2)$$

ここで、 $0 \leq w_t^i \leq 1$ かつ $\sum_{i=1}^{N_{h,t}} w_t^i = 1$ であるとする。また、 $N_{h,t}$ は仮説の総数を表す。さらに、それぞれの仮説を個別の EKF にて追跡する複数仮説追跡 [13] を行い、その結果から $\hat{\mathbf{x}}_t$ の平均 $\boldsymbol{\mu}_t$ を得ることで RO-SLAM を実現する。複数仮説追跡は観測と特徴のデータ対応付けに関する複数仮説の追跡に用いられる場合 [14] がよく知られているが、提案手法の場合ではこれを異なる位置を表す複数仮説を追跡する目的に応用する。提案手法の RO-SLAM では、BLE ビーコンの送信パケットに含まれる UUID, Major, Minor の情報を用いて、受信した RSS 観測データについて送信元の個体識別が可能である。そのため、RSS と BLE ビーコンの対応付けの問題は容易に解決できる。各仮説はすべてのツインビーコンとスマートフォンの位置座標を含んでいる。そのため、式 (2) では、各ツインビーコンとスマートフォンのそれぞれについて、マルチモーダルな分布で位置座標を表現している。これにより、全仮説のうち、

各ツインビーコン位置の初期値が真値に近い仮説において、EKF がスマートフォンの位置を追跡できるようになる。そこで、アンカビーコンの近傍以外の場所でも、移動するスマートフォンの座標を推定することができる。新たな RSS が観測され、各仮説の EKF が更新されるごとに、各仮説の尤度を求め、仮説の重み w_t^i を更新する。これにより、移動が進むとともにツインビーコンの位置座標の推定値を得ることができる。

なお、PDR を推定処理内に用いることで、位置推定の精度の向上が期待できるが、PDR の精度はスマートフォンを持つ観測者の動作に依存する。本研究では、推定により不利な PDR を用いない場合を想定し、この状況でもどの程度の精度でビーコン位置推定結果が得られるかを検討するため、BLE ビーコンの RSS だけで推定を行うこととする。

収集した RSS 観測データは、電波伝搬モデルで記述された RSS と BLE ビーコンとスマートフォンの距離の関係式を用いて、それぞれの EKF において各仮説と密に結合される。

4.2.3 電波伝搬モデル

BLE ビーコンの信号は、送受信機間の距離により減衰する性質を持つ。提案手法では、この関係性をモデル化した Friis の伝達公式を電波伝搬モデルとして採用する [22]。

$$P_i = P_0 - 10\gamma \log_{10}(d_i/d_0) \quad (3)$$

ここで、 P_i は i 番目の BLE ビーコンの RSS、 P_0 は送受信機間の距離が基準距離のときに計測される RSS、 γ は電波の減衰の度合いを表す空間伝搬係数、 d_i は送受信機間の距離、 d_0 は基準距離 (1m) を表す。実際の BLE ビーコンの RSS は、電波信号の反射によるマルチパスや、障害物による遮蔽、干渉などの影響により、式 (3) の電波伝搬モデルの値と隔たりが生じる。モデルの簡単化のため、提案手法では、これらを白色ガウス過程に従う雑音 ν_{RSS} として扱うこととする。4.1 節で述べたように、見通し内の信号を主に利用するため、提案手法の電波伝搬モデルでは見通し外信号を積極的に表現することは考慮しないものとし、遮蔽物に関する変数は含めない。実際には RSS と距離の関係は電波伝搬環境の状態によって変化し、屋内環境では、厳密には場所により最適な式 (3) のパラメータ P_0 、 γ の値が異なることが考えられるが、提案手法では、対象とする屋内空間を代表して 1 組の P_0 、 γ の値を決定し、位置推定に用いるものとする。また、BLE ビーコンの送信アンテナおよびスマートフォンの受信アンテナの利得は、実際には方向によって偏りがあるが、無指向性であると見なして、位置推定では BLE ビーコンおよびスマートフォンの向きにかかわらず同じ電波伝搬モデルを使用する。

4.2.4 ツインビーコンによる仮説数の抑制

提案手法では、位置推定対象の BLE ビーコンが検出されると、BLE ビーコン位置の仮説として、観測された RSS

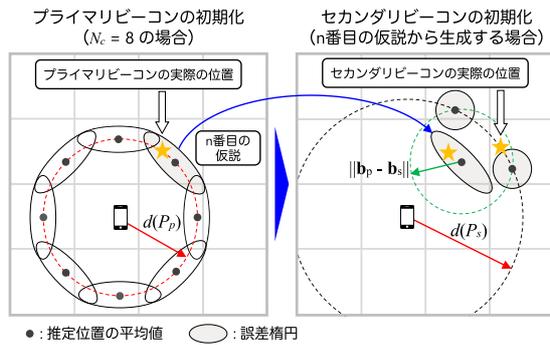


図 3 1組のツインビーコンにおける仮説の生成

Fig. 3 The hypotheses generation for a set of Twin beacons.

を用いて求まる距離から推測可能な複数の位置を考える。送受信機間の距離は、受信したRSSが P_i であるとき、式 (3) の逆関数を用いて次式で示される。

$$d(P_i) = 10^{\left(\frac{P_0 - P_i}{10\gamma}\right)} \quad (4)$$

次に、それまでに存在している \hat{x}_t の各仮説と、検出された BLE ビーコン位置の各仮説のすべての組合せを、新たな \hat{x}_t の仮説とする。

ツインビーコンに対する仮説の生成は次の過程による。1組のツインビーコンのうち、先に検出されたものをプライマリビーコン、後から検出されたものをセカンダリビーコンと呼ぶことにする。まず、プライマリビーコンが検出されると、円周上の異なる位置でプライマリビーコンを初期化した N_c 個の仮説 μ_t^i を生成する。次に、セカンダリビーコンが検出されると、プライマリビーコン仮説に対するセカンダリビーコンの位置は、図 3 に示すような2つの円の交点付近であると考えられることができるため、すでに存在している仮説から、それぞれにおいて複製を作り、2通りの位置でセカンダリビーコンを初期化した仮説 μ_t^i を生成する。

ここで、ツインビーコンを用いることによる、必要な仮説数の抑制効果について検討する。 N_f 個の BLE ビーコンが推定対象であるとする、ツインビーコンを用いない場合は、すべての BLE ビーコンが散在している状態であり、ビーコン間距離の制約を考えないため、それぞれの BLE ビーコンに対して円周上に N_c 個の仮説を考える必要がある。このとき、必要な仮説の総数は $N_c^{N_f}$ となる。一方、ツインビーコンを用いる場合は、 $N_f/2$ 対のツインビーコンが存在することになり、必要な仮説の総数は $(2N_c)^{N_f/2}$ となる。 $N_c = 8$ としたときに生成される仮説数の、ツインビーコンを用いる場合と用いない場合の比較について図 4 に示す。ツインビーコンを用いる場合は、BLE ビーコン数が偶数個の場合のみ示される。位置推定対象の BLE ビーコンが8個のとき、ツインビーコンを用いる場合は、用いない場合に対して1/256まで仮説数を抑制できることが分かる。

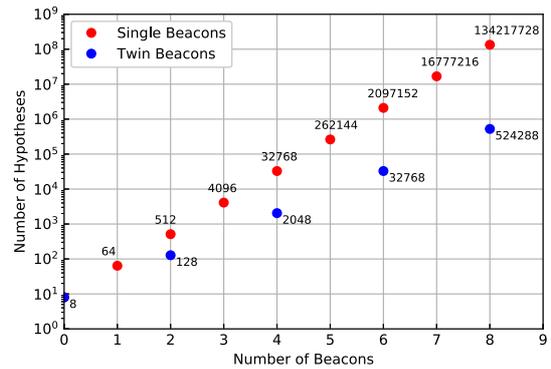


図 4 生成される仮説数の比較

Fig. 4 A comparison of generated number of hypotheses.

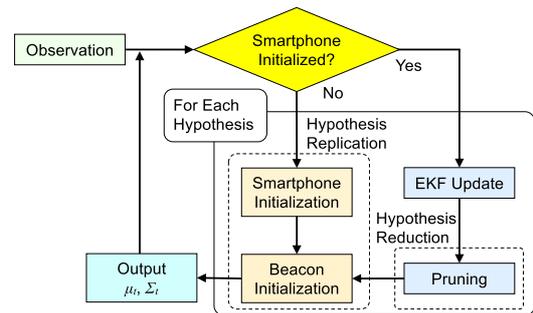


図 5 提案手法における推定処理のフローチャート

Fig. 5 Flow chart of the estimation processing in the proposed method.

4.3 推定アルゴリズム

本節では、4.2 節の手法を実現する推定アルゴリズムについて述べる。全体の流れは、図 5 によって示される。

4.3.1 状態ベクトルの初期化

(1) スマートフォン

推定アルゴリズムは、スマートフォンがアンカビーコン \mathbf{b}_a を検出することで開始する。この場合は、BLE ビーコンではなくスマートフォンの座標について円周上の N_c 個の異なる位置を持つ複数の EKF を生成する。スマートフォンの高さは移動中一定であるものとし、その値 h は分かっているものとする。RSS の値が P_a で最初のアンカビーコンが検出され、その座標が $\mathbf{b}_a = [x_a, y_a, z_a]^T$ であるとき、各 EKF におけるスマートフォンの座標 $\mu_{m,0}^n$ は次のように初期化される。

$$\mu_{m,0}^n = f(x_a, y_a, z_a, h, P_a, n) \quad (5)$$

$$f(x, y, z, h, P, n) = \begin{bmatrix} x + r \cos(\theta_n) \\ y + r \sin(\theta_n) \\ h \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r = \sqrt{d(P)^2 - (z - h)^2}$$

$$\theta_n = 2\pi n / N_c, \quad n = 1, \dots, N_c$$

推定アルゴリズムは $N_{h,0} = N_c$ 個の EKF で開始することになる。

(2) プライマリビーコン

1組のツインビーコンのうち片方の BLE ビーコンが検出されたとき、その BLE ビーコンはプライマリビーコン \mathbf{b}_p として扱われる。RSS の値が $P_{p,t}$ でプライマリビーコンが検出され、スマートフォンの推定位置座標が $\boldsymbol{\mu}_{m,t}^i = [\hat{x}_t^i, \hat{y}_t^i, \hat{z}_t^i]^T$ であるとき、 $N_{h,t}$ 個の EKF のそれぞれを N_c 個に複製し、プライマリビーコンはスマートフォンと同じ高さにあると見なして、各 EKF におけるプライマリビーコンの座標 $\boldsymbol{\mu}_{p,ini}^{i,n}$ を式 (6) を用いて次のように初期化する。

$$\boldsymbol{\mu}_{p,ini}^{i,n} = f(\hat{x}_t^i, \hat{y}_t^i, \hat{z}_t^i, P_{p,t}, n) \quad (7)$$

(3) セカンダリビーコン

プライマリビーコンの相手となる BLE ビーコンはセカンダリビーコン \mathbf{b}_s となる。RSS の値が $P_{s,t}$ でセカンダリビーコンが検出されたとき、スマートフォンの推定位置座標 $\boldsymbol{\mu}_{m,t}^i = A$ 、プライマリビーコンの推定位置座標 $\boldsymbol{\mu}_{p,t}^i = B$ 、セカンダリビーコンの初期位置座標 $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,n} = C$ からなる $\triangle ABC$ を考えることにより $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,n}$ の初期化位置を求める。C は A を中心とした半径 $\hat{d}_{AC} = d(P_{s,t})$ の円と、B を中心とした半径 $\hat{d}_{BC} = \|\mathbf{b}_p - \mathbf{b}_s\|$ の交点となる。 \hat{d}_{BC} は、前述のとおり既知の値である。B と C は同じ高さにあると仮定すると、C は 2通りの位置を考えることができるため、 $N_{h,t}$ 個の EKF のそれぞれを 2個に複製し、 $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,1}$ 、 $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,2}$ の値を余弦定理を用いて求め初期化する。

4.3.2 EKF の予測と更新

状態ベクトル中のスマートフォンが初期化された以降は、各 EKF のそれぞれにおいて、新しい観測 \mathbf{z}_t があるごとに予測ステップと更新ステップが実行される。

(1) 予測ステップ

PDR のセンサ情報が存在しない場合を考え、動作モデルにおいて、状態遷移関数を $f(\boldsymbol{\mu}_{t-1}^i) = \boldsymbol{\mu}_{t-1}^i$ 、制御入力 \mathbf{u}_t をゼロベクトル $\mathbf{0}$ とし、次式でスマートフォンの移動を近似する。

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i = \boldsymbol{\mu}_{t-1}^i \quad (8)$$

$$\bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i = \boldsymbol{\Sigma}_{t-1}^i + \mathbf{Q}_t \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{Q}_t はシステム雑音の共分散行列を表し、スマートフォンの座標に関する雑音を表す σ_m^2 と、ツインビーコンにおける各 BLE ビーコンの座標に関する雑音を表す σ_b^2 で構成される。 σ_m^2 にはスマートフォンの移動距離を考慮した値が与えられる。また、ツインビーコンは静止しているものとするため、 σ_b^2 にはゼロまたは非常に小さい値を用いる。

(2) 更新ステップ

更新ステップでは、観測値として、RSS のほかにツインビーコンの間隔情報を用いる。式 (3) の d_i に、既知の値であるツインビーコンの間隔を代入して得られる値は、仮想

的な RSS 値と見なすことができる。観測ベクトルは、ツインビーコンとアンカビーコンの RSS 観測値と、ツインビーコンの間隔から求まる仮想的な RSS 値を結合したものとす。同様に、計測関数 $h(\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i)$ は、式 (3) における d_i を状態ベクトルの事前推定値 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i$ とアンカビーコンの位置座標で表現し、観測ベクトルの対応する順番に並べたものとなる。これらを用いて、次式より状態ベクトルの事後推定値 $\boldsymbol{\mu}_t^i$ と推定誤差の共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}_t^i$ を得る。

$$\boldsymbol{\mu}_t^i = \bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i + \mathbf{K}_t^i \mathbf{e}_t^i \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_t^i = \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i - \mathbf{K}_t^i \mathbf{H}_t^i \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_t^i = \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i \mathbf{H}_t^i T (\mathbf{H}_t^i \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i \mathbf{H}_t^i T + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{H}_t^i = \left. \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i} \quad (13)$$

$$\mathbf{e}_t^i = \mathbf{z}_t - h(\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i) \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{R}_t は観測雑音の共分散行列を表し、実際に観測した RSS の雑音を表す σ_{RSS}^2 と、ツインビーコンの間隔による仮想的な RSS の雑音を表す $\sigma_{V_{RSS}}^2$ で構成される。正確なツインビーコンの間隔の値が得られていると仮定し、 $\sigma_{V_{RSS}}^2$ にはゼロまたは非常に小さい値を用いる。

4.3.3 仮説の絞り込み

仮説を表す各 EKF の重みは、次の式で与えられる。

$$w_t^i = w_{t-1}^i \cdot \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\mathbf{R}_t|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{e}_t^i T \mathbf{R}_t^{-1} \mathbf{e}_t^i\right) \quad (15)$$

すべての EKF の重みを計算したのち、それぞれの重みの値を $w_t^i = w_t^i / \sum_{i=1}^{N_{h,t}} w_t^i$ として正規化する。

この重みが小さい仮説は推定結果への貢献が小さいと見なせるため、枝刈り (Pruning) [14], [17] と呼ばれるプロセスを用いて仮説の絞り込みを行う。毎回の更新ステップの直後に以下の条件を調べ、あてはまる i 番目の EKF について以降の追跡を停止し、必要とされる計算量を削減する。

- EKF の重み w_t^i が、定められたしきい値を下回ったとき。
- i 番目と j 番目の EKF の事後推定値におけるツインビーコンまたはスマートフォンの位置の差分の最大値が、定められた距離を下回る j 番目の EKF が存在し、かつ i 番目の EKF の重みのほうが小さい ($w_t^i < w_t^j$) とき。

仮説が絞り込まれたあと、各 EKF の状態ベクトルの事後推定値 $\boldsymbol{\mu}_t^i$ の平均を求めることで、時刻 t の位置座標推定結果 $\boldsymbol{\mu}_t$ を得る。さらに、x 座標、y 座標の値を抽出することで、平面上における位置推定結果とする。

$$\boldsymbol{\mu}_t = \sum_{i=1}^{N_h} w_t^i \boldsymbol{\mu}_t^i \quad (16)$$

5. 評価

提案手法の評価のために、実環境に BLE ビーコンを設



図 6 実験環境

Fig. 6 Experimental environment.

置して実験を行った。まず予備実験により、1つの BLE ビーコンから得られる RSS 観測データを、観測地点を変えて収集し、電波伝搬モデルのパラメータを検討した。次に 8 個 (4 組) のツインビーコンと 4 個のアンカビーコンを設置し、位置推定実験を行った。実際に人物がスマートフォンを所持して歩行することにより RSS 観測を行い、収集したデータを用いて提案手法による BLE ビーコン位置推定精度を検証した。

5.1 使用機材

実験では、BLE ビーコンに株式会社芳和システムデザイン社製 BLEAD®を使用した。また、Apple 社の iBeacon® [23] として動作している状態を想定し、アドバタイジングパケットの送信間隔は 100 ms とした。BLE ビーコンの信号を受信するスマートフォンには、BLE ビーコンの RSS の時間変化が確認した中で最も少なかった実機を使用した。機種は Lenovo 社製 Phab 2 Pro であり、OS は Android 6.0 (Marshmallow) を搭載している。RSS 観測データの収集のために、Android API の BluetoothLeScanner クラスを用いて RSS のログを記録する観測用アプリケーションを作成し、スマートフォンにインストールして使用した。作成した観測用アプリケーションでは、単純移動平均により受信した RSS の平滑化を行う [24]。移動平均算出のための時間区間幅において取得した同一 BLE ビーコンの RSS に対し、平均値と分散値を求め、ログとして記録する [25]。移動平均を求める時間区間幅は 1 秒、RSS 観測データの記録レートは 5 Hz とした。

5.2 実験環境と BLE ビーコンの配置

実験は図 6 に示すような吹き抜けのある空間で実施した。BLE ビーコンを設置した領域の広さは 13 m × 11 m である。中央には八角錐形のランドマークが存在し、その周囲を木製のベンチが取り囲んでいる。吹き抜けの上部では、四方を壁またはガラスが取り囲んでいるが、床面と同じ階

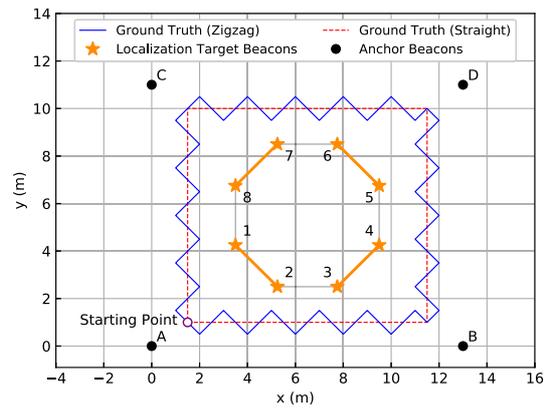


図 7 実験環境のフロアマップ

Fig. 7 Floor map.



図 8 設置された BLE ビーコン

Fig. 8 An installed BLE beacon.

では、この領域の外周部分に柱はあるが壁はない。そのため、近くに壁や障害物がまったくない開放的な状況と比べると、この実験環境では、RSS から推定する距離の精度はある程度劣化すると考えられる。しかし、実際の屋内空間では、電波の反射や遮蔽の影響をある程度受けってしまうことは避けられないため、この実験環境は屋内測位システムを構築する空間を想定した現実的な例と見なすことができる。

位置推定実験では、BLE ビーコンは実験環境内に図 7 に示す配置で設置した。アンカビーコンは、四隅にある柱の側面に床面から 1.8 m の高さで取り付けられた。位置推定対象の BLE ビーコンは、木製のベンチの背もたれの上部に床面から 0.7 m の高さで取り付け、図 7 中のビーコン番号における、(1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8) の組合せをそれぞれ 1 組のツインビーコンとした。ツインビーコンの間隔はいずれも 2.5 m である。すべての BLE ビーコンは図 8 に示す例のように、アンテナが上になるように向きを統一して設置した。BLE ビーコンのアンテナ利得が実際には無指向性ではないことの影響を軽減するためである。また、使用した BLEAD では送信信号強度設定項目は最大 +4 dBm であるが、電池寿命を考慮した利用状況を想定して、送信信号強度設定はすべての BLE ビーコンにおいて -8 dBm を選択した。

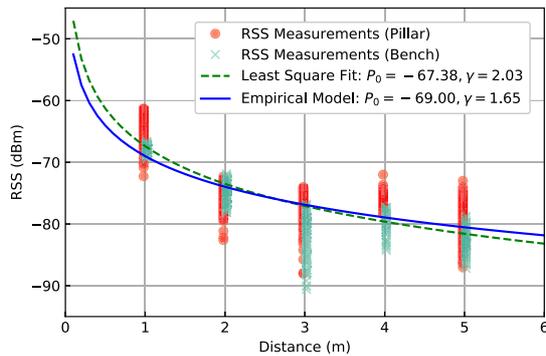


図 9 見通し内の信号による RSS と距離の関係

Fig. 9 Relationship between RSS and distance by LOS signals.

5.3 電波伝搬モデルに関する予備実験

実験環境における電波伝搬モデルを調査するため、環境内に BLE ビーコンを 1 つだけ設置した状態で、水平距離を変えて RSS 観測データをスマートフォンで収集した。BLE ビーコンの設置位置は図 7 中のツインビーコン 5 またはアンカビーコン B の位置の 2 通りとした。観測地点は、BLE ビーコンの設置場所から床面においてそれぞれ 1.0m, 2.0m, 3.0m, 4.0m, 5.0m 離れた 5 通りとし、各地点で観測者がスマートフォンを保持して直立し、約 30 秒間静止してデータの収集を行った。スマートフォンにおいて見通し内で信号を受信できるように、BLE ビーコンとスマートフォンの間は遮るものが何も無い状態とした。観測者がスマートフォンを保持する位置は、BLE ビーコンとの水平距離を床面で計測した値に保つため、ツインビーコンに対しては腰の前、アンカビーコンに対しては額の上とした。スマートフォンの向きは、スマートフォンを縦に立てて、画面を観測者側に向けた状態とした。

図 9 に RSS 観測結果を示す。プロットで示された RSS 観測値は、約 30 秒の観測の間にも多いときには 10 dBm 近く変動しているが、フェージングの影響で RSS が不安定になっているためと考えられる。プロットされた観測値を近似する式 (3) の曲線を最小二乗法で求めたとき、そのパラメータは $P_0 = -67.38$, $\gamma = 2.03$ となった。しかし、 $P_0 = -69.0$, $\gamma = 1.65$ のパラメータを後述の BLE ビーコン位置推定実験に用いたときにも位置推定が良好な値を示したことから、実験環境に対する経験的に求めた電波伝搬モデルとしてこれらの値を採用し、提案手法の評価に用いた。

5.4 BLE ビーコン位置推定実験

5.4.1 RSS 観測データの収集

位置推定実験では、観測者がスマートフォンを所持して実験環境中央にあるベンチの周囲を歩行し、RSS 観測データを収集した。歩行ルートは、図 7 に示す「ジグザグ」「直線」の 2 パターンの形状を使用した。観測者は、座標 (1.5m, 1.0m) の地点で観測用アプリケーションを起動し



図 10 観測時のスマートフォン保持姿勢

Fig. 10 Posture of holding a smartphone during the observation.

たのちに観測ログの記録を開始し、2 秒間静止してから歩行を開始してスマートフォンを保持する位置を保ったまま反時計回りに進み、1 周して少し過ぎたあたりとなる 90 秒経過時点で観測ログの記録を停止した。観測中は、スマートフォンを図 10 に示すように額の上に保持した。これを 1 回の観測とし、上記 2 パターンに対してそれぞれ 8 回ずつ、合計 16 回の観測を行った。スマートフォンの保持する位置を額の上とすることで、ツインビーコンとアンカビーコンの両方に対して、見通し内で信号を受信することを可能にしている。

歩行速度は、「ジグザグ」歩行の場合には 0.707 m/s、「直線」歩行の場合には 0.5 m/s とした。「ジグザグ」の歩行経路長は、「直線」歩行の場合の $\sqrt{2}$ 倍となるため、どちらの歩行パターンの場合にも 1 周にかかる時間は 76 秒となる。これにより、それぞれの歩行パターンにおいて、歩行を開始してから経過した時間に応じた観測者の歩行位置は、観測の開始から終了までずっと近い位置となる。観測者の歩行を決められたルートと速度で行うため、図 7 に示した位置の床面にテープで目印の線をつけ、スマートフォンのメトロノームアプリにより一定のリズムの音を出しながら、1 拍あたり決まった距離を歩行した。そのうえで、図 7 に示した形状の歩行ルートを上記の速度で進んだ場合の各時刻における位置を、観測者歩行軌跡の Ground Truth として検証に利用した。

5.4.2 位置推定実験結果

収集した 16 回の観測のデータを用いて、提案手法により BLE ビーコン位置と観測者歩行軌跡の推定を行った。推定アルゴリズムでは表 1 に示すパラメータの値を用いた。観測雑音の分散値は、表 1 の最小値を上回る場合には観測用アプリケーションで記録した分散値を用いた。また、RSS 観測と 5.3 節の電波伝搬モデルから推定される距離が一定値を超える場合は、その観測を推定において用いないこととした。本研究ではこれを距離マスクと呼ぶことにする。距離マスクを用いる理由は、距離が遠くなるほど、図 9 の

表 1 推定アルゴリズムで用いたパラメータ

Table 1 Parameters used in the estimation algorithm.

パラメータ	値	
電波伝搬モデル		
基準距離 (1 m) における RSS 値	P_0	-69.0 dBm
空間伝搬係数	γ	1.65
EKF 誤差分散		
スマートフォン位置のシステム雑音	σ_m^2	1.0 m ²
BLE ビーコン位置のシステム雑音	σ_b^2	0.1 m ²
観測雑音 (最小値)	σ_{RSS}^2	4.0 dBm ²
ビーコン間隔に対する仮想 RSS の雑音	σ_{VP}^2	0.1 dBm ²
EKF の複製		
プライマリビーコン初期化時の仮説数	N_c	8
距離マスク		
アンカビーコン (EKF 更新ステップ)	5.0 m	
ツインビーコン (EKF 更新ステップ)	10.0 m	
ツインビーコン (プライマリビーコン初期化)	5.0 m	
仮説の絞り込み		
重みのしきい値	1×10^{-5}	
2 仮説の状態ベクトルユークリッド距離のしきい値	5.0 m	

電波伝搬モデルの曲線において曲線の傾きが緩やかになるために、同じ大きさの RSS の雑音に対して距離における誤差がより大きくなり、これが位置推定精度の劣化につながると考えられるためである。EKF 更新ステップにおけるツインビーコンに対する距離マスクは、推定に用いるツインビーコンの個数を多くすることを重視し、アンカビーコンより大きい値とした。プライマリビーコン初期化時にも同様の距離マスクを設定し、さらに生成する仮説数に上限を設けることで、仮説生成時点における隣接仮説間の距離を一定値以内に抑えることができ、仮説のうちのどれかが真値に近い状態を作りやすくする。ここでは、距離マスク 5.0 m、仮説数を一定の値 $N_c = 8$ としたため、仮説生成時の隣接仮説間の距離は 4.0 m 未満となる。

観測終了 (90 秒経過) 時点における、歩行ルートが「ジグザグ」「直線」の場合の位置推定誤差と、推定中の各時刻で用いていた仮説数の最大値を、それぞれ表 2 と表 3 に示す。BLE ビーコン位置の推定誤差は、8 回の観測における平均値、最大値ともに、歩行ルートの違いにより目立った差はみられなかった。合計 16 回の観測を通しての BLE ビーコン位置推定精度は平均 2.14 m を達成した。また同様に、観測者歩行軌跡の推定誤差は、それぞれの歩行ルートにおいて平均値、最大値ともに近い値を示した。合計 16 回を通しては平均 2.94 m の精度であった。仮説数の最大値については観測ごとにはばらつきの大い結果となった。これはフェージングの影響により RSS が不安定になることで、仮説の絞り込みの尤度計算結果が影響を受け、追跡を停止する対象の数が大きく変動しているためと考えられる。それぞれの歩行ルートにおける 8 回の観測の平均値の違いは、「ジグザグ」の No.7 の観測における最大仮説数の値

表 2 歩行ルート「ジグザグ」の場合の推定誤差

Table 2 Result with “Zigzag” walking route.

観測 ID	ビーコン位置推定		観測者歩行軌跡		仮説数
	平均値	最大値	平均値	最大値	最大値
No. 1	3.10 m	5.43 m	3.15 m	7.51 m	194
No. 2	2.45 m	4.49 m	3.02 m	10.33 m	736
No. 3	1.21 m	1.69 m	2.38 m	5.94 m	224
No. 4	1.93 m	3.20 m	3.20 m	10.27 m	496
No. 5	1.57 m	3.03 m	3.02 m	7.22 m	99
No. 6	1.28 m	2.28 m	3.24 m	7.72 m	504
No. 7	3.43 m	4.73 m	3.42 m	9.46 m	4432
No. 8	2.11 m	3.34 m	2.73 m	9.05 m	224
平均値	2.14 m	3.52 m	3.02 m	8.44 m	863.6

表 3 歩行ルート「直線」の場合の推定誤差

Table 3 Result with “Straight” walking route.

観測 ID	ビーコン位置推定		観測者歩行軌跡		仮説数
	平均値	最大値	平均値	最大値	最大値
No. 1	1.98 m	2.51 m	3.12 m	8.89 m	256
No. 2	2.11 m	4.72 m	3.02 m	11.17 m	512
No. 3	2.40 m	4.27 m	2.38 m	6.68 m	256
No. 4	2.53 m	3.40 m	2.83 m	10.37 m	98
No. 5	2.15 m	3.40 m	3.08 m	7.96 m	208
No. 6	1.72 m	3.57 m	2.93 m	9.06 m	934
No. 7	2.30 m	3.72 m	2.70 m	7.13 m	128
No. 8	2.02 m	3.23 m	2.78 m	7.43 m	256
平均値	2.15 m	3.60 m	2.85 m	8.59 m	331.0

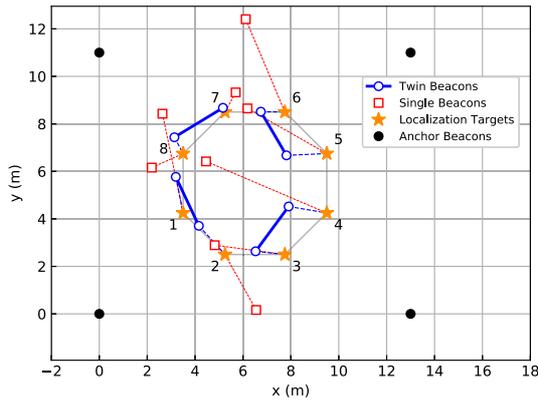
が 4432 と突出しているため、これを除いた平均値は両者ともに似た値となる。

5.5 検証

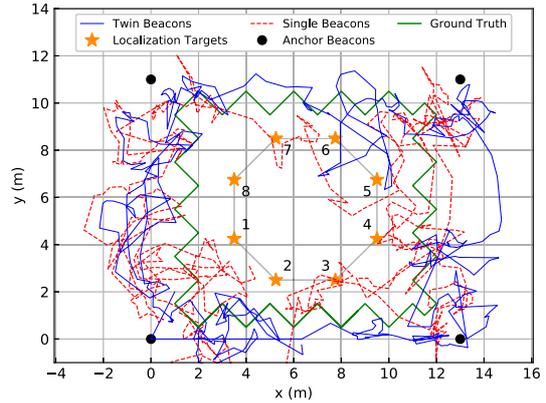
5.5.1 BLE ビーコン位置と観測者歩行軌跡の推定

16 回の観測の中で、BLE ビーコン位置推定が 8 個の平均で比較して最も高い精度であった、「ジグザグ」の No.3 の観測を用いて、BLE ビーコン位置と観測者歩行軌跡の推定の様子を分析する。同じデータに対して、位置推定対象の BLE ビーコンを、ビーコン間の距離情報を持たない個別のビーコンとして扱い、推定アルゴリズムに単一の EKF を用いた場合 (シングルビーコン・単一仮説) の推定結果を求め、比較する。シングルビーコン・単一仮説の推定では、位置推定対象の BLE ビーコンの初期化を、それぞれの BLE ビーコンの検出時点における観測者推定位置を中心とした 10 m 四方の範囲の中からランダムな位置を選択して行った。

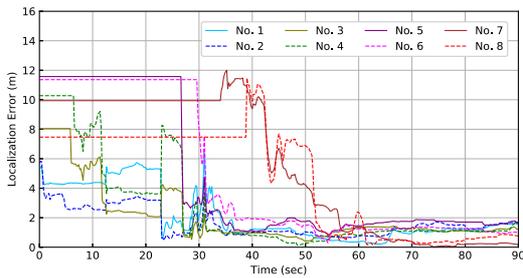
図 11 に BLE ビーコン位置の推定結果を示す。観測終了時点の推定結果 (図 11 (a)) より、提案手法であるツインビーコン・複数仮説追跡の場合には、精度が良好だけでなく BLE ビーコンの配置形状を保って位置推定ができていたことが分かる。他の観測においても結果を確認したところ、配置形状に若干の崩れがみられる場合も存在したが、



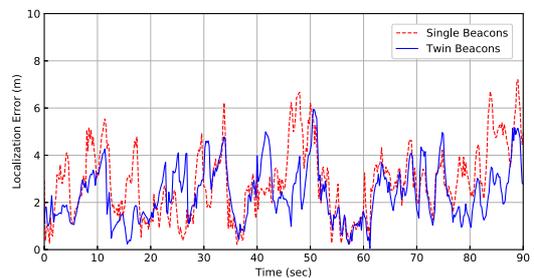
(a) 観測終了時点の推定結果



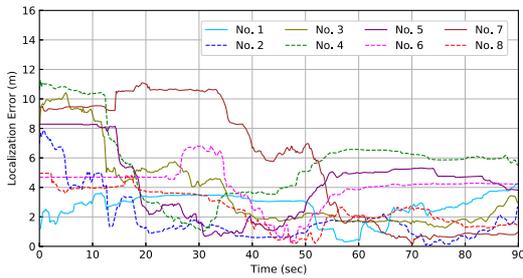
(a) 観測終了時点の推定結果



(b) 時系列誤差 (ツインビーコン・複数仮説追跡)



(b) 時系列誤差



(c) 時系列誤差 (シングルビーコン・単一仮説)

図 11 BLE ビーコン位置の推定結果

Fig. 11 Estimated locations of the BLE beacons.

比較的安定した結果が得られていた。一方、シングルビーコン・単一仮説の場合は、BLE ビーコンによっては 4m 以上の誤差を示しており、明らかに精度が劣る。また、BLE ビーコンの配置形状も崩れてしまっている。さらに、BLE ビーコンの初期化位置に別のランダムな値を選択して試行を繰り返したところ、推定誤差、配置形状ともに大きく変動し、安定した結果を得ることができなかった。次に、時系列誤差を比較すると、ツインビーコン・複数仮説追跡の場合 (図 11 (b)) は、観測開始から 60 秒後の時点で推定値が収束し、すでに観測終了時点に近い精度が得られている。他の観測の場合では観測開始から 60 秒後の時点で推定値の収束に至っていない場合もみられたが、多くの場合においてその後の推定で収束に向かい、精度に改善がみられていた。以上のことより、実験環境においては、提案手法に

図 12 観測者歩行軌跡の推定結果

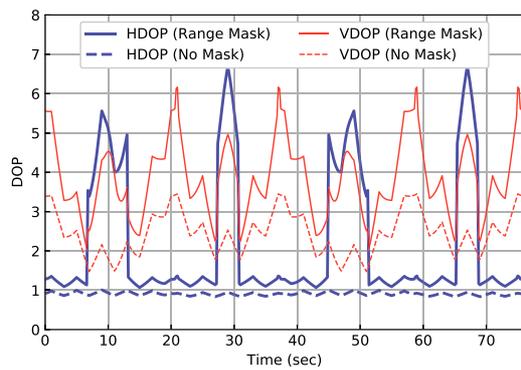
Fig. 12 Estimated trajectory of the walking observer.

において 90 秒程度の観測により BLE ビーコン位置推定が実現できることが確認できた。一方、シングルビーコン・単一仮説の場合 (図 11 (c)) は、観測開始から 40 秒後の時点で精度の改善がみられるものの、その後の推定で精度はあまり改善されていない。

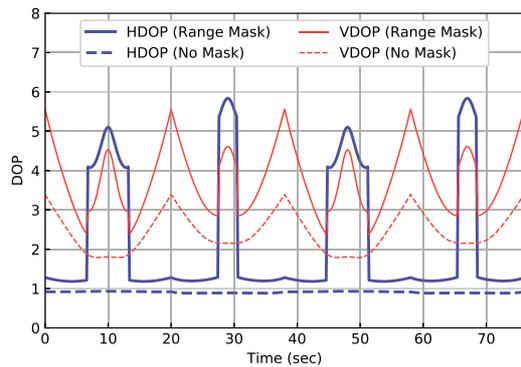
次に、図 12 に観測者歩行軌跡の推定結果を示す。観測終了時点の推定結果 (図 12 (a)) より、提案手法であるツインビーコン・複数仮説追跡の場合は、観測者が実験環境を周回して移動する軌跡が得られていることが確認できる。しかし、歩行ルートに沿ってジグザグに移動する状況までは表現できていない。シングルビーコン・単一仮説の場合においても、一部で歩行ルートを大きく外れているものの、実験環境を周回して移動する軌跡となっている。時系列誤差 (図 12 (b)) の比較では、ツインビーコン・複数仮説追跡とシングルビーコン・単一仮説のそれぞれの場合に大きな差はみられない。これは、シングルビーコン・単一仮説の場合でも、比較的長い時間帯でアンカビーコンの信号を観測、利用できていたことで、観測者の移動を追跡できたためと考えられる。また、それでもシングルビーコン・単一仮説の場合に BLE ビーコン位置の推定精度が低いことは、初期化精度が低いことにその理由を求めることができる。

5.5.2 推定精度における距離マスクの重要性

図 11, 図 12 で用いた「ジグザグ」の No.3 の観測デー



(a) 歩行ルート「ジグザグ」



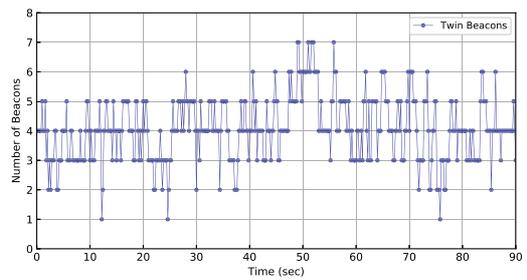
(b) 歩行ルート「直線」

図 13 HDOP と VDOP 理論値の時系列変化

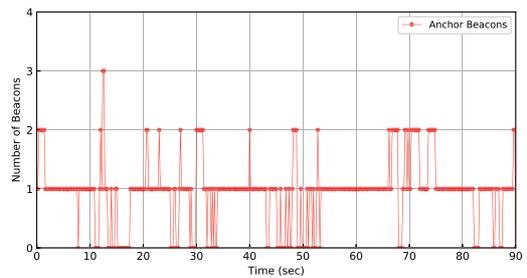
Fig. 13 Time series of theoretical values of HDOP and VDOP.

タに対して、EKF 更新ステップの距離マスクを用いずに提案手法で推定を行ったところ、BLE ビーコン位置の推定精度は平均 4.47 m に劣化した。この状態では、それぞれの BLE ビーコンに対して、検出された以降に観測された RSS をすべて推定に用いている。精度劣化の原因は 5.4.2 項に述べたとおり、観測者に対しての距離が遠いところにある BLE ビーコンの観測雑音に影響しているためと考えることができる。

ここで、実験環境における BLE ビーコンの配置に対し、GNSS における精度低下率 (Dilution Of Precision: DOP) を適用して、BLE ビーコンの配置が位置推定精度に及ぼす影響を考察する。歩行ルートを 1 周する間における、水平精度低下率 (Horizontal Dilution Of Precision: HDOP) と位置精度低下率 (Vertical Dilution Of Precision: VDOP) の理論値の時系列変化を図 13 に示す。提案手法の推定アルゴリズムでは、RSS に対する計測関数を用いているが、本節の HDOP、VDOP の算出においては、GNSS における議論に倣い距離に対する計測関数を用いた。距離マスクを用いない場合の HDOP (点線) は、「ジグザグ」「直線」の両方の歩行ルートにおいて、つねに 1.1 を下回っていることから、BLE ビーコンの配置自体に問題はないといえる。一方で、距離マスクを用いた場合の HDOP (実線) は、と



(a) ツインビーコン



(b) アンカビーコン

図 14 各観測時刻において推定に利用したビーコン数

Fig. 14 Cumulative distribution function of beacon localization errors after the estimation converges.

ころどころで大きな値を示している。このときに RSS 観測データを利用できる BLE ビーコンの数が減っているためである。なお、ここで用いている距離マスクは EKF 更新ステップ用である。仮に BLE ビーコンの観測雑音の影響が無視できる場合、距離マスクを用いると位置推定精度は劣化するはずである。ところが実験データを用いた推定では、距離マスクを用いた場合の方が良い位置推定精度を示した。このことから、推定に利用する BLE ビーコンの数を減らしてでも、距離が遠くにあると考えられる BLE ビーコンの RSS 観測を推定から除外した方が、位置推定精度の向上に効果的であることが考えられる。

「ジグザグ」の No.3 の観測データの各観測時刻において、距離マスクを用いた場合に推定に利用したツインビーコンとアンカビーコンの数を図 14 に示す。推定に利用したツインビーコンの数 (図 14(a)) は、全観測時刻の中で、3 より大きいことがほとんどである。これにより観測者の位置の推定誤差が減り、さらに提案手法の RO-SLAM によってツインビーコン自身の推定誤差も減っていると考えられる。また、推定に利用したアンカビーコンの数 (図 14(b)) は、全観測時刻の中のほとんどで 3 を下回る。このことは、アンカビーコンによる Triangulation では精度が見込めない状況において、提案手法の RO-SLAM によって位置推定を可能にしていたことを示している。

5.5.3 仮説数の時系列変化

実験における 16 回の観測に対して提案手法による推定を行ったときの、推定アルゴリズム中の仮説数の時系列

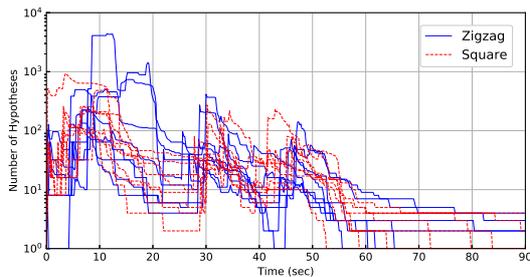


図 15 仮説数の時系列変化

Fig. 15 Time series of number of hypotheses.

変化を図 15 に示す。仮説数は、5.5.1 項でも述べているが、観測ごとのばらつきが大きくなっているのが分かる。また、歩行ルートの違いによる差はここでもみられない。一方で、いずれの観測においても仮説数は図 4 に示される数より大幅に小さい。また、10 秒、30 秒、50 秒の各時点の近辺で 3 回の仮説数のピークがみられる。この理由は、プライマリビーコン初期化に対して距離マスクを用いることで、ツインビーコンが推定アルゴリズムに組み込まれるタイミングが分散されるためである。よって、プライマリビーコン初期化の距離マスクは、推定アルゴリズムの軽量化に貢献できると考えられる。

6. 考察

6.1 提案手法の実用性

まず、提案手法を用いて屋内測位環境を構築したときに、どの程度の測位精度が得られる見込みがあるかを検証する。BLE ビーコン位置の推定結果があらかじめ得られたものと仮定して、5.5.1 項で用いた「ジグザグ」の No.3 の観測データからスマートフォンを測位した結果を表 4 に示す。測位手法は、最も大きい RSS 値を示した BLE ビーコンの座標を推定位置と見なす、単純な Proximiy 方式とした。また、実験環境に設置した 12 個すべての BLE ビーコンを用いた。BLE ビーコンの位置座標に推定結果を用いた場合の測位誤差は、BLE ビーコンの正解位置を用いた場合とくらべてわずかな劣化にとどまっている。そこで、提案手法で推定した BLE ビーコンの位置座標は、実際の屋内測位環境に利用できる可能性が十分にあると考えることができる。

実環境でこのような推定結果を得られたことをふまえると、座標が未知の歩行ルートを用いるという提案手法の目標 (a) については実現できたと考える。もし歩行ルート座標が既知であって 5.5.1 項と同じ観測データを得たとすると、図 7 の Ground Truth を基準点とした最小二乗法による三辺測位から、平均誤差 0.86 m で BLE ビーコンの推定位置が得られる。この場合は基準点の座標を豊富に用いたことが高い精度につながったと考えられる。提案手法の推定結果はここまでは届かず、平均 2.14 m と劣ることにはなるが、前述のとおり推定位置を用いた場合の測位精度劣化

表 4 すべての BLE ビーコンを用いた場合の測位誤差

Table 4 Localization error using all BLE beacons.

BLE ビーコン位置座標	平均値	最大値
推定結果を用いた場合	3.38 m	8.34 m
正解位置を用いた場合	3.22 m	8.34 m

は実用に耐える範囲にとどめられると見込むことができるため、提案手法の実用性は期待に値すると考えられる。歩行ルートの「ジグザグ」「直線」2 パターンの中で、特に差がみられなかったことは、観測者が全体として同じ方向に進むことができているならば、通路と見なされる範囲での進む場所の違いは位置推定精度に影響を与えないことを意味すると考えられる。この点は、観測者の移動に対して自由度を与えるために、有利に働くと考えられる。

ここまで述べた位置推定精度は、RSS の時間変動が大きい BLE ビーコンに対するものであるが、今後の展望として、代わりに距離推定精度がより高い、Time Of Arrival (TOA) 方式などでの測距が可能なビーコンで、大きさや電力消費などの必要な条件を満たせるものがあれば、これらに対する提案手法のアルゴリズムの応用は可能と考えられる。この場合は距離推定精度の向上がそのまま位置推定精度の向上につながる発展可能性がある。

6.2 推定に必要な観測時間とアンカビーコン数の割合

本研究の提案手法は、我々が以前に行った研究 [26] の手法を拡張したものである。改良の中で最も注目できる点は、作成した観測用アプリケーションで移動平均を用いることで、RSS 観測データの記録レートを 1 Hz から 5 Hz に上げたことである。これにより、位置推定精度が収束するタイミングを以前より早めることができた。本研究の評価は文献 [26] と同じ 90 秒間の観測データによるものであるが、実質的な推定速度は速くなったと考えられる。そこで、実験環境の領域は 13 m × 11 m であるため、BLE ビーコンが 10 m 四方に配置されているときの提案手法によるデータ収集の所用時間に対して、90 秒を見積もることは現実的な数字といえる。

この点は、提案手法の目標 (b) の達成を強力に支援できると考える。簡単な想定ではあるが、サイズが 10 m 四方で本研究と同様の配置のセルを m 行 n 列並べ、各セルごとに単純に 90 秒の観測による推定を繰り返す状況を仮定する。アンカビーコンは環境に一樣に分布している必要があるが、想定セルの四隅に設置するパターンを考える。このとき 50 m 四方の領域の観測に要する時間は 37.5 分で取得できることになり、セル間の移動時間を含めても 40 分強でデータ収集が完了するという見積りができる。3 章で述べた文献 [19] の結果は、空間形状やビーコンの検出距離が異なるため単純な比較はできないが、時間だけを見れば大幅な効率化が期待できる。また、このときのアンカ

ビーコン数は、単純な繰返しでは $m \times n \times 4$ となるが、隣接セルでアンカビーコンを兼用できる場合にはその全体の数を減らすことができ、すべての隣接部分で兼用できるとした場合には $(m+1) \times (n+1)$ となる。ツインビーコンをセルあたり 8 個とするとしたときには、隣接セルで兼用をすべて認める場合のアンカビーコン数の全体に対する割合は、10m 四方のときに最大の 33.3% となり、50m 四方では 15.3% まで減少する。個数では 36 個であり、仮に測位環境構築時に座標の計測が必要な場合でも、1 個あたり数分以内での計測ができれば全体を数時間以内で終わらせることが想定できる。

6.3 仮説数の制御

提案手法の目標 (c) については、ツインビーコンと距離マスクの効果により、推定アルゴリズムで扱う仮説の数を低減させていることで、計算負荷を少なくすることができているといえるが、現状では仮説数の最大値を制御できておらず、観測機会ごとに変動がみられる。リアルタイムな推定の実現は、より多くのツインビーコンの位置推定を扱えるようにするために、仮説数の最大値を制御できるような改良が必要と考える。

本研究の位置推定実験では、プライマリビーコンの仮説を初期化時に 8 個生成して評価を行ったが、生成する仮説数 N_c を 4, 6, 10, 12 に変更した場合に、16 回の実験に対する BLE ビーコンの位置推定精度は、実験あたりの平均で 1.21m から 3.62m の間におさまり、仮説数間の目立った優劣の差は生じなかった。RSS 観測データにある一定以上のノイズが含まれていたためと考えられ、 N_c を 8 より増やしても大きな精度の向上は期待できないと考えられる。また、8 より小さい N_c の値でも同等の精度を示したが、 N_c が 4 または 6 の場合、シミュレーションでは試行機会によって推定結果の収束が遅くなる現象がみられたことから、本研究の条件では 8 を N_c の適切な値としている。

6.4 電波伝搬モデルの決定方法

本研究の評価では、経験的に求めたパラメータを電波伝搬モデルに用いたが、5.3 節の予備実験から最小二乗法で求めたパラメータを用いた場合でも、BLE ビーコン位置推定精度は、16 回の観測のうち精度が最良の場合で平均 1.42m、最悪の場合で平均 2.62m を達成した。また、 P_0 と γ の値を変化させてみたところ、「ジグザグ」の No.3 の観測による BLE ビーコンの位置推定精度は、 $P_0 = -67.0$ のときは $\gamma = 1.70, 1.80, 1.90, 2.00$ において、 $P_0 = -69.0$ のときは $\gamma = 1.60, 1.65, 1.70$ において平均 2m を下回った。このことから、電波伝搬モデルのパラメータの、適切な値からのずれは、BLE ビーコンの位置推定精度に対してある程度寛容なものと考えられる。電波伝搬モデルは、対象環境内のあらゆる地点における測定から求めるのが

本来であれば望ましいが、時間と作業量の観点から現実的ではない。電波伝搬モデルのパラメータのずれがある程度許容されるのであれば、環境内の一部の地点での測定からチューニングを施したパラメータを得る運用も可能と考えられることができるが、チューニングの方法を確立することは今後の検討課題である。

7. おわりに

本研究では、屋内測位に用いるために設置された BLE ビーコンに対する、スマートフォンによる RSS 観測のみを使用した位置座標の推定手法を提案した。提案手法では、観測者がスマートフォンを所持し、RSS 観測を目的としたルートで歩行することによりデータ収集するが、歩行経路は座標が既知である必要がなく、歩行者は通路の範囲内を自律的に移動できる。また、2 個 1 組で、絶対座標は不明であるが間隔が既知のツインビーコンを位置座標の推定対象とする。EKF を用いた複数仮説追跡 RO-SLAM により、ツインビーコンとスマートフォンの位置の同時推定を行う。複数仮説を追跡することにより、RSS 観測に必要な歩行時間を短縮することができ、ツインビーコンの間隔の情報を用いることで計算量の軽量化を図ることができた。絶対位置の取得は座標が既知のアンカビーコンを利用して実現する。8 個 (4 組) のツインビーコンと 4 個のアンカビーコンを用いた実環境実験で取得した 90 秒間の観測に提案手法を用いた結果、ツインビーコンの設置座標を平均誤差 2.14m で推定できることを示した。今後は、本研究の成果を拡張することにより、より広域に分布する多数の BLE ビーコンの位置を、1 度の連続した歩行での RSS 観測によって推定する手法を検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、慶應義塾大学大学院博士課程学生研究支援プログラムの支援を受けたものです。また、本研究の実環境実験を行うにあたり、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科特任講師の小高暁氏に多大なご支援をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 浦野健太, 廣井 慧, 梶 克彦, 河口信夫: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp.58–75 (2019).
- [2] 西尾信彦: 図解よくわかる屋内測位と位置情報, 日刊工業新聞社 (2018).
- [3] Han, D., Jung, S., Lee, M. and Yoon, G.: Building a Practical Wi-Fi-Based Indoor Navigation System, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.13, No.2, pp.72–79 (2014).
- [4] Blanco, J., González, J. and Fernández-Madrigal, J.: A Pure Probabilistic Approach to Range-Only SLAM, *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1436–1441 (2008).
- [5] Blanco, J., Fernández-Madrigal, J. and González, J.: Efficient Probabilistic Range-Only SLAM, *2008*

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1017–1022 (2008).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 国土地理院：屋内測位のための BLE ビーコン設置に関するガイドライン〈平成 29 年度版 Ver.1.0〉, 国土地理院 (オンライン), 入手先 (https://www.gsi.go.jp/common/000198740.pdf) (参照 2019-12-19).
- [9] 北須賀輝明, 中西恒夫, 福田 晃: 無線通信網を用いた屋内向け測位方式, *情報処理学会論文誌*, Vol.44, No.SIG 10(ACS 2), pp.131–140 (2003).
- [10] Patwari, N., Ash, J.N., Kyperountas, S., Hero, A.O., Moses, R.L. and Correal, N.S.: Locating the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.22, No.4, pp.54–69 (2005).
- [11] LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., Smith, I., Scott, J., Sohn, T., Howard, J., Hughes, J., Potter, F., Tabert, J., Powledge, P., Borriello, G. and Schilit, B.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE)*, pp.116–133 (2005).
- [12] Menegatti, E., Zanella, A., Zilli, S., Zorzi, F. and Pagello, E.: Range-Only SLAM with a Mobile Robot and a Wireless Sensor Networks, *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.8–14 (2009).
- [13] Alspach, D.L. and Sorenson, H.W.: Nonlinear Bayesian Estimation Using Gaussian Sum Approximations, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.17, No.4, pp.439–448 (1972).
- [14] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D.: *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*, MIT Press (2005).
- [15] Djughash, J., Singh, S., Kantor, G. and Zhang, W.: Range-Only SLAM for Robots Operating Cooperatively with Sensor Networks, *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.2078–2084 (2006).
- [16] Fabresse, F.R., Caballero, F., Maza, I. and Ollero, A.: Undelayed 3D RO-SLAM Based on Gaussian-Mixture and Reduced Spherical Parametrization, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1555–1561 (2013).
- [17] Fabresse, F.R., Caballero, F., Maza, I. and Ollero, A.: An Efficient Approach for Undelayed Range-Only SLAM Based on Gaussian Mixtures Expectation, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.104, pp.40–55 (2018).
- [18] Olson, E., Leonard, J. and Teller, S.: Robust Range-Only Beacon Localization, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.31, No.4, pp.949–958 (2006).
- [19] Seco, F. and Jiménez, A.R.: Autocalibration of a Wireless Positioning Network with a FastSLAM Algorithm, *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp.1–8 (2017).
- [20] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D. and Wegbreit, B.: FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem, *Proc. AAAI Na-*
- tional Conference on Artificial Intelligence*, pp.593–598 (2003).
- [21] 神武直彦: 工業会活動 衛星測位技術の利用と普及: 準天頂衛星を利用したリアルタイム防災システムと屋内測位方式 IMES の紹介, *航空と宇宙: 日本航空宇宙工業会会報*, No.700, pp.19–29 (2012).
- [22] 星 尚志, 石塚宏紀, 小林亜令, 南川教宣: 動的遮蔽物を考慮した BLE による屋内位置推定手法の提案, *情報処理学会論文誌*, Vol.60, No.1, pp.48–57 (2019).
- [23] Apple Inc.: Getting Started with iBeacon Version 1.0, Apple Inc. (online), available from (https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf) (accessed 2020-04-03).
- [24] 佐野博之, 塚本昌克, 片桐雅二, 池田大造, 太田 賢: BLE タグを用いた屋内位置推定手法における耐障害性の向上, *情報処理学会論文誌*, Vol.58, No.5, pp.1138–1150 (2017).
- [25] Brockmann, F., Handte, M. and Marron, P.J.: CutiQueue: People Counting in Waiting Lines Using Bluetooth Low Energy Based Passive Presence Detection, *2018 14th International Conference on Intelligent Environments (IE)*, pp.1–8 (2018).
- [26] Sato, A., Nakajima, M. and Kohtake, N.: Rapid BLE Beacon Localization with Range-Only EKF-SLAM Using Beacon Interval Constraint, *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp.1–8 (2019).



佐藤 章博 (学生会員)

1974 年生。1997 年慶應義塾大学理工学部卒業。1999 年同大学大学院修士課程修了。2015 年より慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科博士課程在籍。屋内測位と衛星測位の研究に従事。



中島 円 (正会員)

1967 年生。2013 年慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科後期博士課程修了。博士(システムエンジニアリング学)。国際航業株式会社に勤務し地理情報システムの研究に従事。2013 年慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科特任講師。2015 年同大学特任准教授。2020 年同大学特任教授。



神武 直彦 (正会員)

1973年生。1996年慶應義塾大学工学部卒業。1998年同大学大学院修士課程修了。1998年宇宙開発事業団開発員。2005年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。博士(政策・メディア)。2006年宇宙航空研究開発機構主任開発員。2009年慶應義塾大学准教授。2018年同大学教授。システムデザインの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, ACM, INCOSE 各会員。