

推薦論文

# 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

佐野 博之<sup>1,a)</sup> 塚本 昌克<sup>1</sup> 片桐 雅二<sup>1</sup> 池田 大造<sup>1</sup> 太田 賢<sup>1</sup>

受付日 2016年9月2日, 採録日 2017年2月9日

**概要:** 位置推定対象端末が屋内の位置推定実施エリア内に設置された Bluetooth Low Energy (以下, BLE) タグのうち一部の電波を観測できない場合において, 位置推定性能の低下を抑制する手法を提案する. 提案手法では, 位置推定対象端末が BLE タグ設置箇所の直近に存在する場合には Proximity による高精度な位置推定を行い, それ以外は直前の位置推定結果によって探索空間を限定した Finger Printing による位置推定を実施する. 12 個中 4 個の BLE タグの電波が観測不能となった状況における平均推定誤差距離が, 既存手法では 2.48 m であったのに対し, 提案手法では 1.91 m であることを評価実験を通じて確認した.

**キーワード:** 屋内位置推定, 耐障害性, Bluetooth Low Energy, Proximity, Finger Printing

## Improving Robustness against BLE Beacon Failures in Indoor Positioning System

HIROYUKI SANO<sup>1,a)</sup> MASAKATSU TSUKAMOTO<sup>1</sup> MASAJI KATAGIRI<sup>1</sup> DAIZO IKEDA<sup>1</sup> KEN OHTA<sup>1</sup>

Received: September 2, 2016, Accepted: February 9, 2017

**Abstract:** We propose a novel indoor localization method that is robust against failures of Bluetooth Low Energy (BLE) beacons to achieve beacon maintenance cost reduction. The electromagnetic environment often changes due to beacon failures such as lost or weakened signals and this causes degradation in the positioning performance. The proposed method addresses this by suppressing the growth in positioning error even if some beacons in the area lost or weaken their signals. Experimental results show that the average positioning error by the proposed method is 1.91 m in the case that 4 of 12 beacons stop sending their signals, whereas the error by an existing method is 2.48 m.

**Keywords:** indoor positioning, robustness, Bluetooth Low Energy, Proximity, Finger Printing

### 1. はじめに

我々は Bluetooth Low Energy (以下, BLE) タグを用いた屋内位置推定に関する研究を行っている. 本論文では, 位置推定実施エリア内に設置された BLE タグの一部に障害が発生した場合においても位置推定性能の低下を抑制するための手法を提案する. 評価実験を通じて, 12 個中 4 個の BLE タグからの電波が観測できない場合においても平

均推定誤差距離を 1.91 m に抑えられることを確認した.

コンテキスト・アウェア・コンピューティングにおいて位置情報は重要なユーザコンテキストとして認識されており [1], 近年ではユーザの屋外位置情報だけでなく, 屋内位置情報を利用したサービスが多数展開されている. 具体的には, 駅構内や地下街での歩行者ナビゲーションや, O2O (Online to Offline)\*1 ソリューションにおいて顧客の滞在位置に関連した情報を配信する位置連動型情報配信, 収集

<sup>1</sup> NTT ドコモ先進技術研究所  
Research Laboratories, NTT DOCOMO, INC., Yokosuka,  
Kanagawa 239-8536, Japan

<sup>a)</sup> hiroyuki.sano.py@nttdocomo.com

本論文の内容は 2015 年 12 月の第 165 回マルチメディア通信と分散処理研究発表会にて報告され, 同研究会主査より情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

\*1 インターネット上での情報接触を契機に実店舗での顧客の購買行動に対して影響を与えるような情報提供サービスのこと.

した顧客の位置情報履歴をもとに顧客の移動傾向を分析する顧客動線分析があげられる。

本論文では、ユーザの位置推定を行う場所を、位置推定実施エリアと呼ぶ。屋内位置推定のために位置推定実施エリア内に設置する機材として、BLE タグが注目されている。BLE とは Bluetooth 4.0 において追加された近距離無線通信規格 Bluetooth の拡張仕様であり、低消費電力の通信を特長とする [2]。その省電力性から、BLE タグは電池駆動が可能であり、BLE タグの設置場所には電源コンセントを必要とせず設置柔軟性に優れる。その反面、BLE タグは電池電圧低下による電波出力の低下や電波送信の停止等、BLE タグの障害に起因する電波状態変化の発生頻度が高い。電波状態変化が発生した際には、位置推定タイミングでの電波観測結果が BLE タグ設置直後（屋内位置推定システム導入時）の電波観測結果と大きく異なり、その結果、位置推定性能の低下へとつながる。

位置推定性能を維持するためには、定期的に BLE タグの保守を実施し、エリア内に設置されたすべての BLE タグを設置直後と同じ状態で動作させる必要がある。しかし、BLE タグに障害が発生するたびに保守を実施することは、保守コストの観点から実現性に欠ける。保守コストの削減は BLE タグを用いた屋内位置推定システム運用の重要な課題である。本研究では、エリア内に設置された一部の BLE タグに障害が発生した場合においても位置推定性能の低下を抑制するための手法を提案し、システム運用中の保守頻度を減らすことによって、保守コストの削減を目指す。提案手法では、正常に動作している BLE タグが設置されている場所においては Proximity による高精度な位置推定を実施し、それ以外の場所では抽象化された地図情報を用いて前回の位置推定結果を基に探索空間を限定した Finger Printing による位置推定を行うことによって、耐障害性の向上を実現した。

提案手法を用いて屋内位置推定システム *Abstract Location Engine* を実装した。本システムのユースケースは商業施設における位置連動型情報配信や顧客動線分析であり、位置推定結果として絶対座標の連続値は必要ない。本システムではノードと呼ばれる抽象化単位への滞在検知による位置推定を行う。商業施設の通路幅や棚幅等から逆算すると、推定誤差距離が 2m 発生した場合、商業施設によっては異なる通路（棚前）の通過と判定される。このため、本研究では推定誤差距離の目標値を平均 2m 以下とする。

以下、本論文の構成について述べる。2 章では近距離無線通信の電波を用いた屋内位置推定に関連した研究について述べる。3 章では、BLE タグを用いた我々の屋内位置推定システムの概要と、位置推定手法について述べる。4 章において提案手法の評価実験結果を示し、考察を行う。最後に 5 章で本論文をまとめるとともに、本研究の今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

近距離無線通信の電波を用いた屋内位置推定手法として、Proximity, Finger Printing, Triangulation の 3 つがよく知られている [3]。また、これらを複数組み合わせた位置推定手法も提案されている。文献 [4] では Finger Printing と Triangulation を組み合わせた位置推定を実施している。文献 [5] では Proximity と Finger Printing を組み合わせた位置推定を実施している。我々の屋内位置推定システムでは文献 [5] と同様、Proximity と Finger Printing の 2 手法を組み合わせた位置推定を実施する。

2.1 節では、まず、Proximity と Finger Printing の 2 手法について説明する。次に、これら 2 手法を組み合わせた文献 [5] の概要について述べ、本論文での提案手法との差分について言及する。2.2 節において、耐障害性に関する研究について述べる。

### 2.1 近距離無線通信の電波を用いた位置推定手法

#### 2.1.1 Proximity

位置推定対象端末によって最も強い Received Signal Strength Indicator（以下、RSSI）が観測された近距離無線通信用デバイスの設置箇所を、位置推定対象端末の位置として出力する手法である。得られる位置推定結果は連続値ではなく離散値であり、その離散間隔は近距離無線通信用デバイスが設置された間隔と等しい。

Proximity のメリットとして、位置推定対象端末が近距離無線通信用デバイスの直近に位置するときの位置推定性能が高いことがあげられる。デメリットとして、近距離無線通信用デバイスの設置されていない場所、もしくは、近距離無線通信用デバイスを設置したがそのデバイスの電波が観測できなくなった場所においては、位置推定を行うことができないことがあげられる。細かい粒度の位置推定を行う場合には、位置推定実施エリア内に近距離無線通信用デバイスを密に設置する必要がある。

#### 2.1.2 Finger Printing

位置推定時における電波の測定結果を、位置推定実施エリア内の各推定箇所において事前に電波測定を行った結果（以下、電波マップ）と比較し、比較結果が類似する箇所を位置推定対象端末の位置として出力する手法である。得られる位置推定結果は離散値であり、その離散間隔は事前に電波測定を行った推定箇所の間隔と等しい。

電波マップには電波の反射や吸収の影響が含まれており、それらと位置推定時の測定結果を比較するため、電波の反射や吸収の影響による推定誤差が小さくなるというメリットがある。デメリットとして電波マップの作成コストが高いことがあげられ、そのコスト削減を目的とした研究も存在する。文献 [6] では、壁による減衰を組み込んだ電波の伝搬損失モデルを用いて電波マップを補間する手法が

提案されている．文献 [7] ではワイブル関数を用いて電波マップのモデル化を行い，事前計測のサンプル数を減らしても Finger Printing が動作することが示されている．

### 2.1.3 Hybrid: Proximity + Finger Printing

次に，Proximity と Finger Printing を組み合わせた既存研究について述べる．Proximity と Finger Printing を組み合わせることにより，Finger Printing のみで位置推定を実施する場合と比較して位置推定性能が向上したことが報告されている [5]．

文献 [5] では，既設の Wi-Fi アクセスポイントが多数存在する位置推定実施エリアに対して Bluetooth デバイスを設置する．Bluetooth デバイスの電波到達距離は数メートル程度に設定されており，それぞれの Bluetooth デバイスの電波被覆領域が重ならない間隔で設置する．設置した Bluetooth デバイスによって，位置推定実施エリアを複数のリージョンに分割する（1つのリージョンには複数の Bluetooth デバイスを含む）．位置推定時に Bluetooth の電波が観測できた場合，Proximity による位置推定を行い，該 Bluetooth デバイスの設置場所が位置推定結果となる．Bluetooth の電波が観測できなかった場合には，前回の Proximity による位置推定結果のリージョンで測定された電波マップのみを比較対象として，Wi-Fi の Finger Printing による位置推定を行う．また，異なるリージョン間を接続する Bluetooth デバイスが存在し，Proximity によって該 Bluetooth デバイス設置場所への滞在が検知された場合に，リージョン間の移動が可能となる．

しかし文献 [5] の提案手法では，位置推定実施エリア内に設置した機材に対して障害が発生することを考慮されていない．特に，異なるリージョン間を接続する Bluetooth デバイスに対して障害が発生し，Proximity によって該 Bluetooth デバイス設置場所への滞在が検知されなくなった場合，リージョン間を移動できず，それ以降正常な位置推定が不可能になるという問題が発生する．

本研究でも Proximity と Finger Printing を組み合わせた位置推定を行うが，人の平均移動速度および通路等の状況を考慮して比較対象の電波マップを限定したうえで Finger Printing を行う点が文献 [5] との差分である．これにより，障害発生時に Proximity による位置推定結果が得られなかった場合においても Finger Printing による位置推定誤差を軽減させることが可能となり，耐障害性の向上へとつながる．

## 2.2 位置推定性能の耐障害性向上に関する研究

2.1 節で述べた手法は，位置推定実施エリア内に設置された近距離無線通信用デバイスがすべて正常に動作していることを前提とする．近距離無線通信用デバイスに対して障害が発生した場合，位置推定性能は低下する．位置推定性能を維持するためには，BLE タグの保守や電波マップの

再構築が必要である．本節では Finger Printing における電波マップ再構築に関する研究について紹介する．

文献 [8] では，電波マップを自動更新するためのロボットが提案されている．位置推定実施エリア内に Wi-Fi アクセスポイントとは別に RFID タグを設置し，ロボットが RFID タグを基に自己位置推定を行うと同時に Wi-Fi の電波計測を行い，電波マップを自動で更新する．人手で電波マップの再構築を行うことなくつねに最新の電波マップが自動的に得られる．

文献 [9] では，位置推定実施エリア内に長時間滞在する人による電波強度計測結果を基に，電波マップを自動更新する手法が提案されている．位置推定実施エリア内に長時間滞在する人が Pedestrian Dead Reckoning（以下，PDR）[10] 用の端末を所持しながら位置推定実施エリア内を回遊し，PDR による自己位置推定を行うと同時に Wi-Fi の電波計測を行う．PDR による位置推定結果と Wi-Fi の電波強度計測結果とを対応付け，電波マップの自動更新を行う．位置推定実施エリアとして商業施設を例にあげると，商業施設のスタッフが位置推定実施エリア内に長時間滞在する人に相当する．スタッフが通常業務を行うために施設内を回遊すると同時に無意識的に電波マップの更新が行われるため，電波マップ再構築のためだけに施設内を回遊する必要がない．

また，文献 [11], [12] のように，クラウドソーシングによって電波マップを自動更新する手法も提案されている．文献 [11] では，不特定多数のユーザによって収集された電波計測結果のクラスタリングを実施し，その結果を生成済みの電波マップと比較することによって電波マップの自動更新を行う．文献 [12] では，不特定多数のユーザによって収集された電波計測結果を PDR による自己位置推定結果と対応づけることによって電波マップの自動更新を行う．

文献 [8], [9], [11], [12] は，電波マップの再構築を自動的あるいは無意識的に行うための研究である．近距離無線通信用デバイスに対して障害が発生したとしても，障害発生後に再構築された電波マップを用いることによって位置推定性能を維持することができる．しかし，商業施設のような実環境においてスタッフに対してつねに PDR 端末の保持を命じることや，実環境内をつねにロボットが巡回することは現実的ではない．また，クラウドソーシングに関しても十分な参加者数が確保できなければ期待した効果が得られない．実環境においても導入が容易な手法の検討が課題である．

## 3. Abstract Location Engine

### 3.1 システムの概要

図 1 に，我々の屋内位置推定システム *Abstract Location Engine*（以下，*ALE*）のシステム概要を示す．図 1 において二重枠の矩形が *ALE* を表している．*ALE* は，位置推



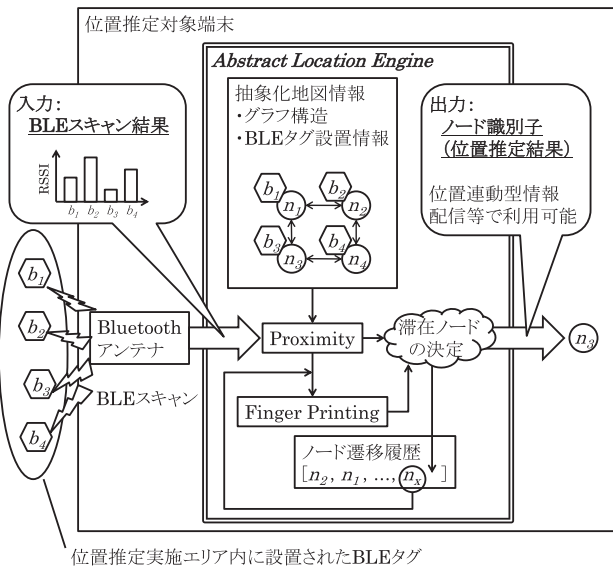


図 1 ALE のシステム概要  
Fig. 1 System architecture.

定のために Proximity と Finger Printing の 2 手法を実行するそれぞれのモジュールと、データとして抽象化地図情報とノード遷移履歴を持つ。ALE への入力は BLE タグの電波計測結果であり、ALE は位置推定結果としてノードの識別子を出力する。

位置推定対象端末は位置推定実行時に BLE の電波を計測する。その結果得られた各 BLE タグの識別子と RSSI の一覧を ALE に対して与える。BLE タグの計測結果を受け取った ALE は、直前の位置推定結果と、抽象化された地図情報を基に、各 BLE タグの RSSI から現在の滞在ノードを推定する。

### 3.2 抽象化地図情報

ALE は、位置推定対象端末の位置情報をノードと呼ばれる単位で抽象化したうえで推定する。ノードは柵の前や通路の入り口、交差点等、ある地点を指す。屋内位置推定システムの主なユースケースとして、屋内ナビゲーション、位置連動型情報配信、顧客動線分析があげられる。屋内ナビゲーションでは位置推定粒度として連続値が求められるが、位置連動型情報配信や顧客動線分析では連続値は必要ない。これは、位置連動型情報配信や顧客動線分析では、顧客が通過・滞在した通路を特定できればよいためである。ALE が想定しているユースケースは商業施設における位置連動型情報配信や顧客動線分析であり、屋内ナビゲーションは対象としない。したがって、ALE ではノード単位で離散化された位置推定を行う。

抽象化された位置情報を求めるために、ALE では抽象化された地図情報をシステム内部に保持する。その実体は実世界での通路情報を重み付きグラフへ変換したものである。図 2 は位置推定実施エリアの地図の例と、その地図

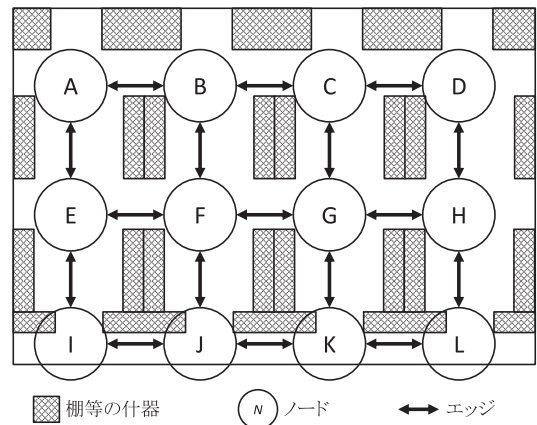


図 2 位置推定実施エリアマップと抽象化されたグラフ構造  
Fig. 2 Example of floor plan and its abstracted graph structure for a target area.

を基に抽象化した地図情報をグラフ構造として重畳表示したものである。図 2 において網掛けの箇所は柵等が設置されており、人は通行不可能である。白抜きの箇所は障害物がなく、人が自由に通行可能である。図 2 に示した位置推定実施エリアにおいては、通路が交差する箇所（交差点）が 12 個存在する。ALE では交差点をノードとし、ノード間の通路をエッジとしたグラフ構造を用いて、地図情報の抽象化を行う。ただしノードを設置可能な場所は交差点に限定しない。交差点以外の場所で位置推定を実施したい場合、その場所にノードを設置することも許容する。

図 2 では、○で括られた A から L がノードを表す。ALE ではすべてのノードに対して BLE タグの設置を前提とする。各ノードの識別子は、そのノードに設置された BLE タグの識別子と対応づけてシステム内に保持される。全ノードに対して BLE タグを設置することにより、位置推定実施エリア内における位置推定対象端末の動線を必要十分な粒度で取得できる。

エッジはノード間の通路であり、それぞれのエッジはノード間のユークリッド距離をコストとして持つ。本コストは 3.3.3 項で述べる探索空間の限定を行うために用いられる。

### 3.3 ALE の位置推定処理

図 3 は ALE における位置推定処理のフローチャートである。ALE では、位置推定対象端末で観測された RSSI に対して平滑化処理を適用した後に、Proximity と Finger Printing を組み合わせて位置推定対象端末の滞在ノードを推定する。

RSSI が事前に設定した閾値  $th$  を超過したときには、ALE は Proximity によって位置推定対象端末の近接ノードを判定し、その近接ノードを位置推定対象端末の滞在位置として出力する。それ以外の場合、Proximity による位置推定結果を出力せず、Finger Printing による位置推定

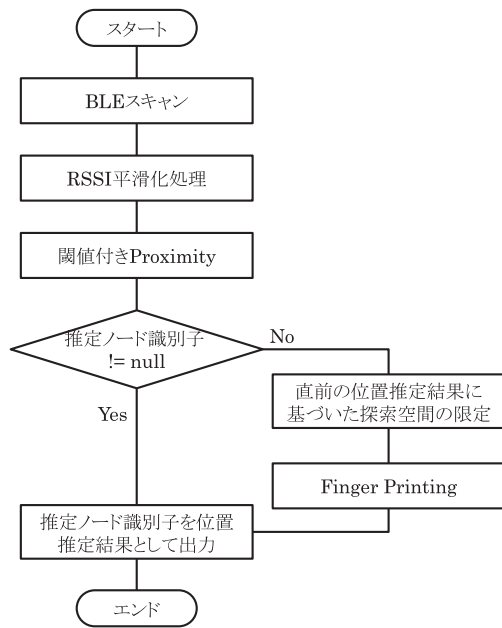


図 3 ALE における位置推定処理のフローチャート

Fig. 3 ALE flowchart to localize current user position.

を実施する。その際、位置推定対象端末の直前の滞在位置に基づき、探索空間を限定して Finger Printing を実施することによって、位置推定性能の向上を図った。以降、それぞれのフローの詳細について述べる。

### 3.3.1 RSSI 平滑化処理

RSSI を用いた位置推定では観測ノイズによって位置推定誤差が増加する。電波は障害物からの反射や吸収の影響が大きく、同じ場所で電波計測しても毎回同じ観測結果が得られるとは限らないためである。位置推定のために RSSI を用いる代わりに、時間情報を用いる Time of Arrival (ToA) [13] や角度情報を用いる Angle of Arrival (AoA) [14] といった手法も提案されている。しかし我々が屋内位置推定のために用いる BLE タグのアドバタイジングパケットには時間情報や角度情報が含まれていないことを想定しているため、本研究では ToA や AoA は採用していない。

RSSI の観測ノイズが位置推定結果に与える影響を小さくするため、RSSI を平滑化したうえで位置推定に用いることが好ましい。本論文では平滑化のためのローパスフィルタとして、単純移動平均を用いた。

ALE は BLE の電波計測を 1 秒に 1 回行う。ALE の動作プラットフォームである Android 端末では、1 回の計測結果として、1 つの BLE タグから複数の RSSI が返り値として得られる\*2。num(t,b) を時刻 t における BLE タグ b の RSSI の計測結果数と定義し、{rssi<sub>t,b,1</sub>, rssi<sub>t,b,2</sub>, ..., rssi<sub>t,b,num(t,b)</sub>} を時刻 t の計測結果における BLE タグ b の RSSI と定義すると、時刻 t における BLE タグ b からの

\*2 端末搭載の Bluetooth チップセットやドライバによって計測結果数は異なる。本論文の実験で用いた SONY Xperia™ Z2 Tablet (Android 4.4.2) では、1 回の計測につき 1 つの BLE タグから 3~5 の計測結果が得られた。

単純移動平均 MA\_RSSI<sub>t,b</sub> は、下記の式によって計算できる。

$$MA\_RSSI_{t,b} = \frac{\sum_{p=t-w+1}^t \sum_{q=1}^{num(p,b)} rssi_{p,b,q}}{\sum_{p=t-w+1}^t num(p,b)}$$

ここで w は移動平均を計算するためのウィンドウ幅 (秒) である。ウィンドウ幅が小さいと十分な平滑化の効果が得られず推定誤差が大きくなり、ウィンドウ幅が大きいと位置推定の遅延につながる。本論文での評価実験では経験的に w = 3 としたが、ウィンドウ幅の適切な値に関しては今後も引き続き検討が必要である。

### 3.3.2 閾値付き Proximity

計測結果に含まれるすべての BLE タグの観測結果に対して上記平滑化処理を実施した後、Proximity による滞在ノードの推定を実施する。時刻 t における平滑化した結果の RSSI である R<sub>B</sub> を、R<sub>B</sub> = {b ∈ B | MA\_RSSI<sub>t,b</sub>} と定義する。ここで B は BLE 計測結果に含まれていたすべての BLE タグの集合を表す。時刻 t における位置推定対象端末の滞在ノード s\_node<sub>t</sub> は、下記式によって決定される。ただし、下記式において、node(b) は、BLE タグ b が設置されたノードの識別子を返すような関数とする。

$$s\_node_t = \begin{cases} node(\arg \max_{b \in B} MA\_RSSI_{t,b}) & \text{if } \max R_B \geq th \\ null & \text{otherwise} \end{cases}$$

上記式では、RSSI の単純移動平均が最大となるような BLE タグに着目し、その移動平均の値が閾値 th 以上であった場合、その BLE タグの設置されたノードを位置推定対象端末の滞在位置として出力する。最大である移動平均の値が閾値 th を下回った場合、Proximity による位置推定結果は出力されない。

ALE は直前の位置推定結果を基に Finger Printing による位置推定の探索空間を限定するため、適切なタイミングで Proximity によって正しく位置推定を実施できれば、システム全体としての推定誤差を大きく軽減できる。Proximity による推定誤差を軽減するためには、閾値 th を高めに設定すればよい。ただし、Proximity によって位置推定結果が出力される回数が大幅に減少する。すなわち、適合率が向上し、再現率が低下する。実験を通じて閾値 th を適切に決定する必要がある。その実験結果については 4.3 節で詳しく述べる。

### 3.3.3 探索空間を限定した Finger Printing

単純移動平均の最大値が閾値 th 以下であった場合、ALE は Proximity による位置推定結果を出力せず、Finger Printing による位置推定を実施する。Finger Printing による位

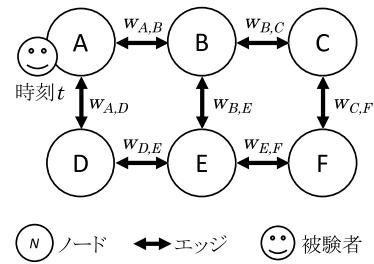
位置推定はユーザの滞在位置を目的変数としたクラス分類問題として扱うことができ、本研究では怠惰学習である  $k$  近傍法 [15] を適用した。それぞれの BLE タグにおける RSSI の単純移動平均値を各要素に持つベクトルを特徴ベクトルとし、そのベクトルの近傍に存在する  $k$  個の訓練例の多数決によってユーザの滞在位置を決定する [16]。

本論文では  $k = 5$  として ALE の評価を行った。これは  $k$  を 1 から 10 の間で変化させて予備実験を行ったところ、 $k = 5$  のときに、交差検定結果の平均推定誤差距離が最小となったためである。平均推定誤差距離に関しては、4.3 節で算出式を示す。 $k$  の最適な値は位置推定実施エリアの環境ごとに異なることが予想され、環境に合わせて  $k$  の値を適切にチューニングする必要がある。

Finger Printing の位置推定において、一部 BLE タグの電波が観測不能となった場合、提案手法では特徴ベクトルの次元数を削減したうえで、初期状態よりも低次元の特徴ベクトルを用いて  $k$  近傍法の距離計算を行う。具体的には、電波マップ作成時に、あるノードにおいて  $\{r_{b_1}, r_{b_2}, r_{b_3}, r_{b_4}, r_{b_5}\}$  という訓練例が記録されたとする。ここで、 $b_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ) はそれぞれ異なる BLE タグを、 $r_{b_n}$  は BLE タグ  $b_n$  の RSSI を表す。位置推定を実施するタイミングにおいて、 $\{s_{b_1}, s_{b_2}, s_{b_5}\}$  という電波が観測できたとする。これは、 $b_3$  と  $b_4$  の電波が観測できなかったことを意味する。その際、 $k$  近傍法の距離計算として、訓練例のベクトル  $\mathbf{v}$  を  $\mathbf{v} = [r_{b_1}, r_{b_2}, r_{b_5}]^T$ 、観測ベクトルを  $\mathbf{w}$  を  $\mathbf{w} = [s_{b_1}, s_{b_2}, s_{b_5}]^T$  として扱い、ベクトル  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{w}$  間の距離を計算する。使用できる情報量が電波マップ作成時より少なくなるため、位置推定性能が低下する。本論文では、特徴ベクトルの次元数削減による位置推定性能の低下を抑制するために、移動履歴に基づき Finger Printing の探索空間を限定する。

探索空間の限定は、ノード間を移動するために必要となる平均時間と、直前の滞在ノードへ移動したと判定された時刻から現在までの経過時間  $\theta$  を比較することによって処理する。図 4 を用いて具体例を示す。図 4 の例では、ALE によって、時刻  $t$  にノード A へ移動したと判定されたとする。ALE が時刻  $t + \theta$  に Finger Printing によって位置推定する際には、時刻差分  $\theta$  の間にノード A から移動可能なノードのみに限定して  $k$  近傍法の距離計算を行う。

3.2 節の最後で述べたように、ALE ではエッジに対してノード間の物理的距離がコストとして与えられている。エッジのコストを人の平均移動速度  $v$  で除算することによって、それらのノード間を移動するために必要とされる平均時間が計算可能である。たとえば図 4 の上部に示した抽象化地図では、ノード A とノード B の間には  $W_{A,B}$  というコストが与えられている。ノード A からノード B へ移動するために必要な平均時間は  $W_{A,B}/v$  で算出可能である。なお、ノード A からノード C のように 1 ホップで移



移動元	移動先	移動に必要な平均時間
A	B	$W_{A,B}/v$
	C	$(W_{A,B} + W_{B,C})/v$
	D	$(W_{A,D} + W_{D,E})/v$
	E	$(W_{A,D} + W_{D,E})/v$
	F	$(W_{A,D} + W_{D,E} + W_{E,F})/v$

図 4 ノード A から各ノードへ移動するために必要となる平均時間  
Fig. 4 Average time to walk between node A and node X.

動できないノードに関しては、ダイクストラ法 [17] のような最短経路問題を解くアルゴリズムを用いて最小コストを求め、最小コストを平均移動速度で除算することによって必要となる平均時間を求めることとする。

図 4 下部に示した抽象化地図に関して移動に必要な平均時間をまとめたものが図 4 下部の表であり、それぞれ 3 列目の値が  $\theta$  を下回るノードが移動可能なノードである。ALE ではそれらのノードのみを対象に  $k$  近傍法の距離計算を行う。

#### 4. 評価・考察

提案手法の有効性を確認するために、実験室環境に 12 個の BLE タグを設置して実験を行った。まずは予備実験を行い、3.3.2 項で述べた Proximity の閾値  $th$  を決定した。次に、予備実験で決定した閾値  $th$  を用いて、提案手法の耐障害性を評価した。予備実験結果に関しては 4.3 節で、提案手法の耐障害性評価実験に関しては 4.4 節で詳しく述べる。

##### 4.1 実験環境

本実験では BLE タグとして、株式会社芳和システムデザインの BLEAD®<sup>\*3</sup> を使用した。BLEAD は Apple の iBeacon® [18] として動作する BLE タグであり、そのアドバタイジングパケット送信間隔は 100 ms である。各 BLE タグを高さ約 0.8 m の什器の上に設置した。BLE タグの周辺には電波を遮断・吸収するような物を配置していない。

図 2 は本実験環境のエリアマップとグラフ構造を表している。本実験では 12 個の BLE タグを、4.4 m 間隔で  $3 \times 4$  の長方形となるように設置した。各エッジのコストとして、BLE タグ間のユークリッド距離 4.4 を与えた。本環境

\*3 <http://www.houwa-js.co.jp/index.php/ja/products/blead>



は大型商業施設のような BLE タグを数百個設置する大規模な実運用環境のサブセットを想定している。

位置推定対象端末として、SONY Xperia™Z2 Tablet を利用した。OS は Android 4.4.2 KitKat である。位置推定対象端末内では、BLE タグの識別子・RSSI・観測時刻の 3 つをセットとし、BLE 計測ログとして記録する。

#### 4.2 評価用データの収集

まずは各ノードにおいて BLE 計測ログを収集し、Finger Printing における  $k$  近傍法の訓練例を作成した。各ノードにおいて、設置された BLE タグの周辺 (BLE タグを中心とし、半径約 2 メートル以内のエリア) で約 60 秒間位置推定対象端末によって BLE 計測ログを収集し、得られたログに対してウィンドウを 1 秒ごとにスライドさせ、単純移動平均を計算した。上記の作業をすべてのノードで繰り返し、訓練例を作成した。ここで作成した訓練例は、Finger Printing における電波マップに相当する。

次に被験者は、位置推定対象端末を保持したまま実験エリア内を回遊し、BLE 計測ログの収集を実施した。回遊経路として、

- A, B, C, D, H, G, F, E, I, J, K, L
- A, E, I, J, F, B, C, G, K, L, H, D
- A, B, C, D, H, L, K, J, I, E, A

の 3 パターンを設定した。それぞれの記号は図 2 におけるノードを表す。上記 3 パターンの回遊経路を 5 回ずつ、計 15 回の回遊を行い、まずは 4.3 節の予備実験で使用する BLE 計測ログを収集した。次に、計 15 回の回遊を再度同様に実施し、4.4 節の評価実験で使用する BLE 計測ログを収集した。

実験エリア回遊中には、各 BLE タグに最接近したときにその時刻と BLE タグの設置されたノード識別子を記録した。本記録データを正解データと呼ぶ。回遊中に被験者は等速歩行したため、正解データを次のように扱った。時刻  $t_a$  にノード  $n_a$  で正解データを記録し、次の記録が時刻  $t_b$  でノード  $n_b$  で行われたと仮定する。この場合の時刻  $t_x$  ( $t_a \leq t_x \leq t_b$ ) における正解ノード  $c\_node_{t_x}$  は下記式のように扱う。

$$c\_node_{t_x} = \begin{cases} n_a & \text{if } t_a \leq t_x \leq \frac{t_a + t_b}{2} \\ n_b & \text{otherwise} \end{cases}$$

#### 4.3 Proximity 閾値決定のための予備実験

予備実験を実施し、3.3.2 項で述べた Proximity の閾値  $th$  を  $-62$  dBm に決定した。本節では実施した予備実験と、閾値  $th$  を  $-62$  dBm とした理由について述べる。

本予備実験では、閾値  $th$  が Proximity の位置推定性能に与える影響を調査した。閾値  $th$  を  $-70$  dBm から  $-50$  dBm まで  $1$  刻みで変化させ、それぞれの値における位置推定性

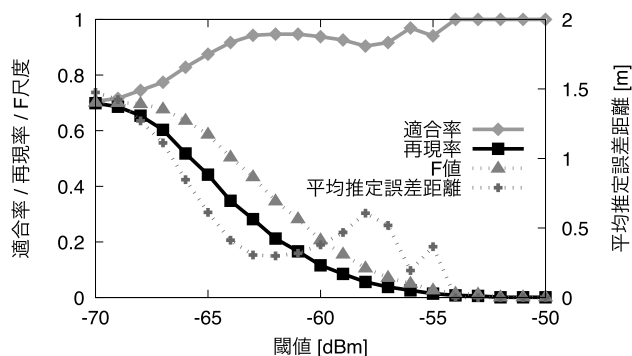


図 5 Proximity における閾値と位置推定性能  
Fig. 5 Relationships between threshold value and its positioning performance for the proximity method.

能を算出した。位置推定性能の指標として、適合率、再現率、F 値を調査した。ここでの適合率とは、Proximity が出力した位置推定回数を母数としたときの、正解出力数の割合である。再現率とは、本来システムが出力すべき回数を母数としたときの、正解出力数の割合である。F 値は適合率と再現率の調和平均である。また、参考値として、平均推定誤差距離を計算した。ここでの平均推定誤差距離は、RSSI が閾値  $th$  を超え Proximity によって滞在ノードが出力された場合のみを計測対象とし、RSSI が閾値  $th$  を超えず滞在ノードが出力されなかった場合は、計測対象としない。本論文では平均推定誤差距離  $E$  を下記式によって求めた。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dis(ale_i, cor_i)$$

ここで、 $n$  は Proximity によって位置推定が行われた総数であり、 $dis(ale_i, cor_i)$  は ALE による出力ノード  $ale_i$  と正解ノード  $cor_i$  とのユークリッド距離である。 $ale_i$  の  $xy$  座標を  $(ale_{i,x}, ale_{i,y})$  とし、 $cor_i$  の  $xy$  座標を  $(cor_{i,x}, cor_{i,y})$  とすると、 $dis(ale_i, cor_i)$  は下記の式で与えられる。

$$dis(ale_i, cor_i) = \sqrt{(ale_{i,x} - cor_{i,x})^2 + (ale_{i,y} - cor_{i,y})^2}$$

図 5 に本予備実験結果のグラフを示す。 $-70 \leq th < -61$  の間では、閾値  $th$  を大きくするに従って適合率が上がり再現率および F 値が減少する。また、平均推定誤差距離も減少する。しかし、 $-61 \leq th < -54$  の範囲においては、適合率および平均推定誤差距離が安定していない。これは、適合率はシステムが出力した位置推定回数を母数としており、閾値  $th$  を大きくすることによって母数が減少した結果、電波の揺らぎによる位置推定誤りの影響が大きく表れてしまったためである。平均推定誤差距離に関しても同様の理由で、 $-61 \leq th < -54$  の間で増減が目立つ。

4.2 節で述べた回遊試験の回数を増加することによって、適合率および平均推定誤差距離に関してはより安定した評価を実施可能である。しかし本論文では、上記実験で得られた再現率から閾値を決定することとし、追試は実施して

いない。ここでの再現率は本来システムが出力すべき回数を母数としており、適合率や平均推定誤差距離とは異なり閾値の大小による影響を受けないためである。

閾値  $th$  は再現率が 0.18 を下回らない範囲で最大となるような値を採用し、 $-62$  dBm とした。その理由について述べる。BLE タグの直近を通過したときのみ Proximity によって検知するような閾値は、適合率が非常に高いことが期待される。本予備実験の回遊試験ではノード間の 4.4 m を約 0.8 m/s で移動したため、ノード間の移動には約 5.5 (= 4.4/0.8) 秒かかる。すなわち、5.5 秒間隔で BLE タグの直近を通過したこととなり、その瞬間のみを Proximity で検知するような閾値を採用すると、1 秒に 1 回位置推定を実施する ALE では、理論的には再現率が 0.18 ( $\approx 1/5.5$ ) となる。再現率は閾値  $th$  の増加にともない単調減少しており、 $th = -62$  では 0.21、 $th = -61$  では 0.17 であった。上記の理由により、本研究では閾値  $th = -62$  を採用した。なお、 $th = -62$  としたときの適合率は 0.94、平均推定誤差距離は 0.30 m であり、その位置推定性能は非常に高い。

#### 4.4 耐障害性の評価実験

提案手法の耐障害性を評価するために実施した実験と、その結果について述べる。実験結果から、電波観測不能となった BLE タグの数が増加しても平均推定誤差距離を抑制できることを確認した。

本評価実験では、BLE 計測ログから特定の BLE タグから発信された電波のログの値を変更することによって、擬似的に一部 BLE タグに対して障害が発生した BLE ログを作成して位置推定性能を計測した。障害が発生した BLE タグの数を 0 から 6 つの間で変化させ、位置推定性能がどのように変化するかを確認した。12 個の BLE タグの中で  $n$  個の BLE タグに対して障害が発生する状況を想定した場合、その組合せは全部で  ${}_{12}C_n$  通りが存在する。本研究ではそれら全パターンを評価した。

BLE タグに発生する障害として、本実験では (1) 電波出力低下、(2) 電波出力停止、の 2 つを評価対象とした。電波出力低下に対する耐障害性の評価結果は 4.4.1 項で、電波出力停止に対する耐障害性の評価結果は 4.4.2 項で述べる。

##### 4.4.1 電波出力低下に対する耐障害性

すべての BLE タグが正常に動作している状態において収集した BLE ログに対し、一部の BLE タグから発信された電波の強度を 15 dBm 弱くすることによって電波出力低下している状況を擬似的に作成してシミュレーション評価を実施した。15 dBm という値は、文献 [9] を参考にした。

図 6 に実験結果を示す。横軸は電波出力が低下した BLE タグの数を、縦軸は平均推定誤差距離 (メートル) を表す。手法 (1) は“閾値あり Proximity + 探索空間限定 Finger Printing”であり、本論文における提案手法である。比較評価のために、手法 (2) から (4) の評価も実施した。手法

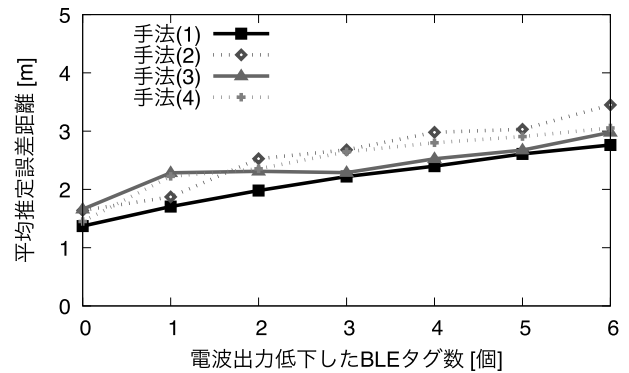


図 6 電波出力低下した BLE タグ数と位置推定性能

Fig. 6 Average positioning error for each number of weakened beacons.

(2) は“Proximity”，手法 (3) は“Finger Printing”であり、(2) と (3) は既存の屋内位置推定手法単体での利用である。手法 (4) は“閾値あり Proximity + Finger Printing”であり、(2) と (3) を組み合わせた手法であるが、手法 (1) と異なり Finger Printing 時に探索空間の限定を実施しない。

(1) から (4) のどの手法においても、電波出力が低下した BLE タグの数が増加するに従って平均推定誤差距離が増加している。ただし提案手法である (1) では、2 つの BLE タグからの電波出力が低下した場合においても、平均推定誤差距離が 2 m 以下に抑えられている。ALE の主なユースケースは商業施設内での位置運動型情報配信であり、具体的には、ユーザが棚前を通過したときにその棚に配置されている商品と関連したコンテンツをユーザに配信するような動作を想定している。2 m より大きな位置推定誤差が発生した場合、ユーザが通過した場所とは異なる棚に配置されている商品と関連したコンテンツが配信される可能性があり、ユーザの混乱を招く。手法 (2) から (4) では、2 つの BLE タグからの電波出力が低下した場合に平均位置推定誤差が 2 m を超過している。

##### 4.4.2 電波出力停止に対する耐障害性

次に、電波出力停止に対する提案手法の耐障害性評価を行った。一部の BLE タグから発信された電波を BLE 計測ログから削除することによって、擬似的に電波出力停止している状況を作成してシミュレーション評価を実施した。本項での評価実験で使用した BLE 計測ログは、4.4.1 項の評価実験で使用した BLE 計測ログと同一のものである。本実験を通じて、提案手法を適用することにより、4 つの BLE タグの電波が観測不能となった場合においても平均推定誤差距離を 2 m 以下に抑えられることを確認した。

図 7 に実験結果を示す。横軸は電波観測不能となった BLE タグの数を、縦軸は平均推定誤差距離 (メートル) を表す。4.4.1 項と同じ手法 (1) から (4) に関して評価を行った。(1) から (4) のどの手法においても、電波観測不能となった BLE タグの数が増加するに従って平均推定誤差距離が増加するが、本論文での提案手法 (1) では、平均推定



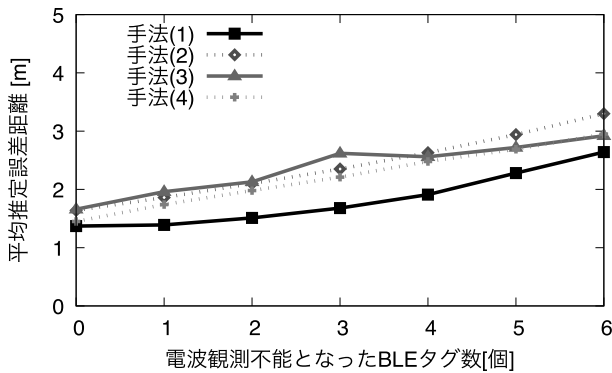


図7 電波観測不能となったBLEタグ数と位置推定性能

Fig. 7 Average positioning error for each number of inoperative beacons.

誤差距離の増加が最も緩やかである。すべてのBLEタグの電波が観測できるとき、すなわち、電波状態に変化がない場合においては、(1) 1.37 m ( $\sigma = 2.43$ ) と(4) 1.45 m ( $\sigma = 2.45$ ) がほぼ同等の性能を示した。BLEタグの1つが観測不能となった際、(4) では平均推定誤差距離が1.74 m ( $\sigma = 2.54$ ) となり、一気に0.29 m 増加したにもかかわらず、(1) の平均推定誤差距離は1.39 m ( $\sigma = 2.45$ ) であり、0.02 m の増加に抑えられた。

(1) では4つのBLEタグの電波が観測不能となった場合においても、平均推定誤差距離が1.91 m ( $\sigma = 2.65$ ) に抑えられた。それに対して、他の手法では2つのBLEタグからの電波が観測不能となった時点で平均推定誤差距離が2 m を超過していた。

#### 4.5 考察

##### 4.5.1 保守コスト削減効果

提案手法を適用したことによって期待される、ALE運用期間中の保守コスト削減効果について考察を述べる。提案手法によって、ALEの運用期間中の保守コストを33~60%程度削減できることが期待される。

ALEを運用するために位置推定実施エリア内に事前に設置したBLEタグには、意図しないタイミングで障害が発生する。しかし本論文では単純に、障害が発生したBLEタグの個数がシステム運用時間に対して線形に増加すると仮定する。また、システム運用期間中は、平均推定誤差距離が2 m を超過した場合にBLEタグの保守を実施すると仮定する。上記条件のもと、障害が発生し電波が観測不能となった場合と、電波出力が低下した場合の2パターンを想定し、コスト削減効果を見積もった。

既存手法では、2つのBLEタグからの電波が観測不能となったときに平均推定誤差距離が2 m を超過するため、その時点で保守を実施する必要がある。しかし本論文での提案手法を適用すると、2つのBLEタグからの電波が観測不能となったときでも平均推定誤差距離が2 m 以下に抑えられており、その時点ではまだ保守を実施する必要はな

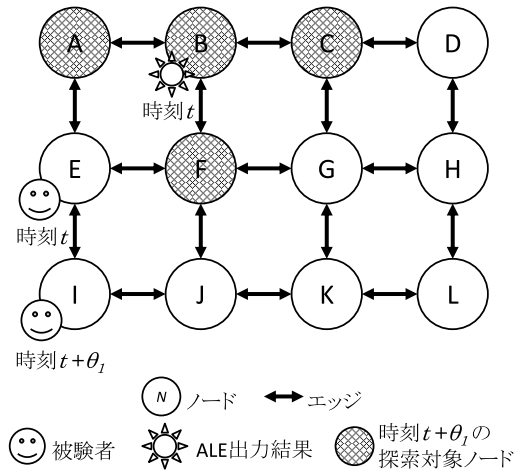


図8 探索空間の限定によって位置推定性能が悪化する例

Fig. 8 Example that ALE cannot output the correct node due to restricted search space based on previous incorrect results.

い。提案手法では5つのBLEタグからの電波が観測不能となったときに平均推定誤差距離が2 m を超過するため、その時点で保守を実施する必要が発生する。つまり、本手法を適用することによって保守間隔を2.5 (= 5/2) 倍へと延伸することが可能となり、システム運用期間中の保守回数を0.4 (= 1/2.5) 倍に抑えられる。

電波出力低下時に関しても同様に見積もると、平均推定誤差距離が2 m を超過するのは既存手法では2つ、提案手法では3つである。つまり、本手法を適用することによって保守間隔を1.5 (= 3/2) 倍へと延伸することが可能となり、システム運用期間中の保守回数を0.67 (= 1/1.5) 倍に抑えられる。

保守実施のためのコスト構造においては、人件費が大半を占めており、BLEタグのハードウェア費用等は人件費に比べると微々たるものである。保守回数を0.4~0.67倍に減らすことによって、人件費を33~60%程度削減できることが期待される。

##### 4.5.2 探索空間限定の有効性

前回の位置推定結果を基に探索空間を限定することによって全体的に誤推定の回数を減らすことができたが、探索空間を限定したことによって新たに発生した問題が存在する。具体的には、誤った位置推定結果を基に探索空間を限定した結果、探索対象の中に正解ノードが含まれなくなり、その事象が連続して推定誤差距離が累積することがあった。

具体例を図8に示す。図8において‘A’から‘L’はノードを表し、それぞれのノード間の矢印はエッジを表す。時刻tにおいて位置推定対象末端が実際にはノードEに存在していたにもかかわらず、ALEによる位置推定結果がノードBであった(誤判定)と仮定する。時刻t+theta\_1の位置推定においては、時刻tの位置推定結果であるノードBから

$\theta_1$  内に移動可能なノードに候補を限定して位置推定が行われる。  $\theta_1$  内に移動可能な距離を 1 エッジ分と仮定した場合、時刻  $t + \theta_1$  に移動可能であるノードは、ノード A, B, C, F である。時刻  $t + \theta_1$  に位置推定対象端末がノード I へ移動したとしても、探索空間をノード A, B, C, F に限定した上で位置推定を行うため、必ず誤判定となる。また、時刻  $t + \theta_2$  (ただし、 $\theta_1 < \theta_2$ ) においては、時刻  $t + \theta_1$  の誤判定結果を基に探索空間が限定されるため、時刻  $t + \theta_1$  と同様の事象が発生する可能性がある。

上記の問題を解決するためには、Finger Printing に関しても閾値を導入し、観測ベクトルと最近傍の訓練例の距離がその閾値を下回ったときにのみ位置推定結果を出力することが有効であると考えられる。また、ベクトル間の距離が閾値を超過した場合は前回の位置推定結果が誤っている可能性があり、バックトラックして前回の位置推定をやり直すことも必要である。

この問題は、人が平均移動速度を上回る速度でノード間を移動した場合にも発生する。提案手法では、人がノード間を等速で移動することを前提としている。しかし商業施設内での実際の人の移動を考えた場合、一定速度で移動しない状況も存在する。たとえば興味のない商品の売り場では早歩きで移動し、そのときの移動速度は、人の一般的な平均移動速度を超過する。早歩きで移動した場合、探索空間を限定した結果内に移動先の正解ノードが含まれなくなり、必ず誤った位置推定結果が出力される。

逆に、興味のある商品の売り場でゆっくり歩いた場合、すなわち、移動速度が人の一般的な平均移動速度を下回った場合においては、探索空間を限定した結果内に移動先の正解ノードが含まれなくなることは発生しない。

#### 4.5.3 電波出力が低下した BLE タグ特定の重要性

次に、電波出力が低下している BLE タグを特定する手法を確立することの重要性について述べる。実験結果から、提案手法は電波出力低下よりも電波出力停止に対する耐障害性の方が高いことが明らかになった。その理由は、電波出力低下している BLE タグの RSSI が、 $k$  近傍法によって位置推定を実施する際にノイズとなってしまったためである。システムが電波出力低下した BLE タグを特定することができれば、それらの BLE タグの RSSI を位置推定に用いないことによって位置推定結果を向上させることが可能であり、特定手法の確立は重要な課題である。

本課題の解決にあたっては Proximity の活用が有効である。Proximity の閾値を高く設定すると、設置された BLE タグの電波出力が低下した場合にその RSSI は閾値を超過することがないため、位置推定結果として当該の BLE タグが設置されたノード ID は出力されない。逆に、Proximity によってノード ID が出力された場合には、該当ノードに設置されている BLE タグは正常に動作しており、その位置推定結果の確信度は高い。Proximity によ

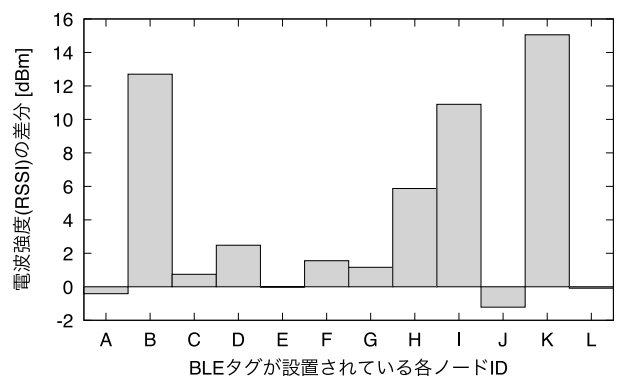


図 9 ノード L の電波マップとノード L で電波計測した結果との RSSI 差分

Fig. 9 Example of differences between measured signal strength and fingerprints on node L.

てノード ID が出力されたタイミングで観測ベクトルと電波マップとの差分を計算することによって、電波出力低下している BLE タグの候補を抽出可能であると考えられる。

図 9 を用いて例を示す。この例は、ノード B, I, K の BLE タグの電波出力が低下している状況下において、ノード L の電波マップの RSSI (各訓練例の平均値) と、被験者がノード L 滞在中に観測された各 BLE タグの RSSI との差分を棒グラフとして出力したものである。ノード B, H, I, K に設置された BLE タグにおいて差分が顕著であることが確認でき、特にノード B, I, K に関しては、10 dBm 以上の差分が見られる。これら差分の原因は、ノード B, I, K に関しては設置された BLE タグの電波出力の低下、ノード H に関しては観測ノイズが原因であり、電波出力低下・観測ノイズの切り分けは統計的に可能であると考えられる。実装評価を通じて本アイデアの有効性を検証する必要がある。

#### 4.5.4 BLE タグの設置規則性と位置推定性能の関係

最後に、BLE タグの設置規則性が位置推定性能に与える影響に関して考察する。4.1 節で述べたように、本評価実験では等間隔で直交したメッシュ状に BLE タグを設置した。しかし商業施設のような実環境では、規則的に BLE タグを設置できない場所も存在する。BLE タグの設置間隔が狭くなる場所や、広がる場所が発生する。本項では、規則的に BLE タグを設置しなかった場合に起こりうる事象について考察を行う。ただし、人が平均移動速度で移動しているという前提のもとで考察を行い、4.5.2 項の後半で述べた問題が発生しないことを仮定する。

規則的に BLE タグが設置された場合には、前回の滞在ノードから 1 ホップで移動可能なノードすべてが移動可能ノードとなるが、非規則的に設置された場合では、さらに効率良く移動可能ノードが限定される。このため、探索空間限定に関しては、不規則的な BLE タグの設置によってより効果的に働くことが予想される。

具体例を図 10 を用いて示す。図 10 の左図 (1) は、BLE

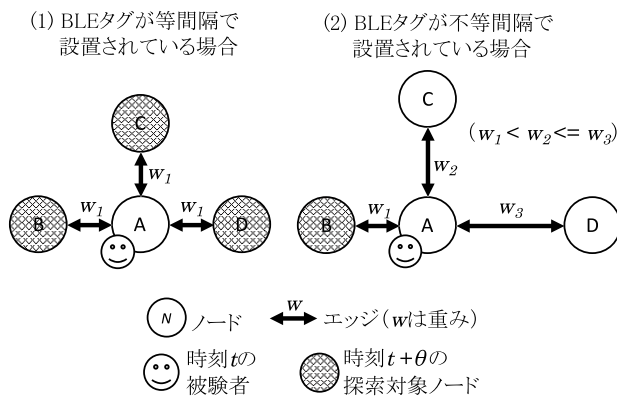


図 10 BLE タグ設置規則性が探索空間に与える影響  
 Fig. 10 Effect of regularity on BLE tags installation.

タグを等間隔に設置した図である。BLE タグが  $w_1$  間隔で規則的に設置されている。図 10 の右図 (2) は、BLE タグを不等間隔に設置した図である。BLE タグがそれぞれ、 $w_1, w_2, w_3$  ( $w_1 < w_2 \leq w_3$ ) の間隔で設置されている。これらの環境下で、被験者が時刻  $t$  においてノード A に滞在していたとする。時刻  $t+\theta$  の位置推定のために探索空間を限定した場合、 $w_1 \leq v \times \theta \leq w_2$  ( $v$  は人の平均移動速度) であれば、左図 (1) における探索対象ノードは B, C, D となる。しかし、右図 (2) においては、時刻  $t+\theta$  の探索対象ノードは B のみに限定される。ここで示したように、不規則な BLE タグの設置は、探索空間が限定という観点では有利である。

しかし、BLE タグの設置間隔が広がった場合、電波マップの被覆エリアが新たな課題となる。電波マップの被覆エリアとは、位置推定実施エリア内において、Finger Printing の  $k$  近傍法で使用する電波マップが作成された場所を示す。

4.2 節で述べたように、本論文の評価実験では  $k$  近傍法の訓練例として、BLE タグを中心とした半径約 2 メートル以内の場所で電波マップを計測した。評価実験における BLE タグの設置間隔は 4.4 メートルであったため、位置推定実施エリアの大半の場所で電波マップが計測できていたことを意味する。しかし BLE タグの設置間隔が 4.4 メートルよりも広がった場合に本評価実験と同等の条件で電波マップを計測すると、電波マップを計測できていない場所の割合が大きくなる。すなわち、電波マップの被覆エリアが狭くなり、結果的に位置推定性能が低下してしまうことが懸念される。BLE タグ間の設置間隔が広がった場所においては、BLE タグからの半径を広げて電波マップの計測を実施する必要がある。また、位置推定時に同時観測できる BLE タグの数が減少し、Finger Printing の計算に用いる観測ベクトル次元数も小さくなることも、位置推定性能が低下する原因となりうる。

なお、BLE タグの設置間隔が狭くなる場所では、電波マップを計測できていない場所の割合が小さくなるだけで

あり、特に位置推定性能の低下は発生しないことが予想される。

## 5. おわりに

本論文では、BLE タグを用いた屋内位置推定システムの保守費用削減のために、BLE タグの障害発生時においても位置推定性能の低下を抑制することを課題とした。提案手法では、Proximity と Finger Printing を組み合わせた位置推定を実施する。Finger Printing 時には抽象化された地図情報を用いて直前の滞在ノードから移動可能なノードを限定したうえでノード推定を実施することによって、位置推定性能の低下を防止する。

実験室での評価実験を通じて、提案手法の有効性を確認した。提案手法によって、12 個中 4 個の BLE タグが故障した場合においても平均推定誤差距離を 1.91 m に抑えられることを確認した。他手法では 12 個中 2 個の BLE タグが故障した場合に平均推定誤差距離が 2 m を超過しており、比較評価実験によって提案手法の有効性を示した。本手法を適用することによって BLE タグの保守タイミングを遅らせることが可能となり、保守費用の削減へ貢献できる。

最後に本研究の今後の課題について述べる。まず、Finger Printing に関しても閾値を導入し、閾値を超過した場合に前回の位置推定をやり直す手法の有効性について評価を行う。次に、Proximity での位置推定時に、Finger Printing に作成した電波マップとの差分を計算することによって電波出力が低下している BLE タグを特定する手法の有効性について評価を行う。これら 2 手法に関する詳細は 4.5 節で述べた。また、大型の商業施設に大量の BLE タグを設置し、実運用環境において提案手法の有効性を検証する。

## 参考文献

- [1] Abowd, G.D., Dey, A.K., Brown, P.J., Davies, N., Smith, M. and Steggles, P.: Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness, *Proc. 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing, HUC '99*, London, UK, pp.304–307, Springer-Verlag (online), available from (<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=647985.743843>) (1999).
- [2] Gomez, C., Oller, J. and Paradells, J.: Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology, *Sensors*, Vol.12, No.9, p.11734 (online), DOI: 10.3390/s120911734 (2012).
- [3] 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 (online), DOI: 10.1109/TSMCC.2007.905750 (2007).
- [4] Torteeka, P., Xiu, C. and Yang, D.: Hybrid technique for indoor positioning system based on Wi-Fi received signal strength indication, *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN 2014*, Busan, South Korea, October 27–30, 2014, IEEE, pp.48–



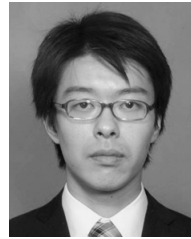
- 57 (online), DOI: 10.1109/IPIN.2014.7275467 (2014).
- [5] Baniukevic, A., Sabonis, D., Jensen, C.S. and Lu, H.: Improving Wi-Fi Based Indoor Positioning Using Bluetooth Add-Ons, *Proc. 2011 IEEE 12th International Conference on Mobile Data Management - Volume 01, MDM '11*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp.246–255 (online), DOI: 10.1109/MDM.2011.50 (2011).
- [6] 久保田僚介, 田頭茂明, 荒川 豊, 北須賀輝明, 福田 晃: 無線 LAN を用いた屋内位置推定における学習コスト削減のための高精度データ補間手法, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.4, pp.1609–1618 (オンライン), 入手先 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009579575/> (2013).
- [7] Pei, L., Chen, R., Liu, J., Tenhunen, T., Kuusniemi, H. and Chen, Y.: Inquiry-Based Bluetooth Indoor Positioning via RSSI Probability Distributions, *Proc. 2010 Second International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, SPACOMM '10*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp.151–156 (online), DOI: 10.1109/SPACOMM.2010.18 (2010).
- [8] Yeh, L.-W., Hsu, M.-S., Lee, Y.-F. and Tseng, Y.-C.: Indoor localization: Automatically constructing today's radio map by iRobot and RFIDs, *2009 IEEE Sensors*, pp.1463–1466 (online), DOI: 10.1109/ICSENS.2009.5398451 (2009).
- [9] 谷内大祐, 前川卓也: 位置フィンガープリントの自動更新を用いた電波環境変化に頑健な屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.1, pp.280–288 (オンライン), 入手先 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009660256/> (2014).
- [10] Beauregard, S. and Haas, H.: Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning, *Proc. 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp.27–35 (2006).
- [11] Yu, N., Xiao, C., Wu, Y. and Feng, R.: A Radio-Map Automatic Construction Algorithm Based on Crowdsourcing, *Sensors*, Vol.16, pp.504–535 (2016).
- [12] Chang, K. and Han, D.: Crowdsourcing-based radio map update automation for wi-fi positioning systems, *Proc. 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Crowdsourced and Volunteered Geographic Information, GeoCrowd '14*, pp.24–31 (2014).
- [13] Chan, Y.-T., Tsui, W.-Y., So, H.-C. and Ching, P.-C.: Time-of-arrival based localization under NLOS conditions, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.55, No.1, pp.17–24 (online), DOI: 10.1109/TVT.2005.861207 (2006).
- [14] Rong, P. and Sichertiu, M.L.: Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks, *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Vol.1, pp.374–382 (online), DOI: 10.1109/SAHCN.2006.288442 (2006).
- [15] Macqueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pp.281–297 (1967).
- [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, 2003 (PerCom 2003)*, pp.407–415 (online), DOI: 10.1109/PERCOM.2003.1192765 (2003).
- [17] Dijkstra, E.W.: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numer. Math.*, Vol.1, No.1, pp.269–271 (online), DOI: 10.1007/BF01386390 (1959).
- [18] Apple: Getting Started with iBeacon (online), available

from <https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf> (2014).

## 推薦文

BLE タグを用いた屋内位置推定における問題点を指摘し、実用的な改善案を提案している。評価実験を通じて、12 個中 4 個の BLE タグが観測不能となった状況においても精度が高く有用性が高い研究だと判断した。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 重野 寛)



佐野 博之 (正会員)

平成 25 年名古屋工業大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。現在, NTT ドコモ先進技術研究所勤務。Web インテリジェンス, データマイニング, 屋内位置推定に関する研究開発に従事。



塚本 昌克

平成 18 年株式会社 NTT ドコモ入社。平成 26 年東京工業大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。現在, NTT ドコモ先進技術研究所勤務。筋電義手, バイオメトリクス, モバイルコンピューティングに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



片桐 雅二 (正会員)

昭和 61 年早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。日本電信電話, UC Berkeley 訪問研究員, NTT ドコモマルチメディア研究所, ドコモ USA 研究所等を経て, 現在, NTT ドコモ先進技術研究所主幹研究員。図形処理, マルチメディアアプリケーション, データマイニングの研究開発に従事。大阪大学博士 (情報科学)。電子情報通信学会, IEEE 各会員。本会シニア会員。



池田 大造

マサチューセッツ工科大学 (MIT) 大学院修士課程修了。東京大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。1996 年 NTT 移動通信網 (現, NTT ドコモ) に入社。以来, モバイルインターネット (i-mode) を実現するパケット移動通信ネットワーク開発, 標準化, トラフィック制御の研究に従事。現在, NTT ドコモ先進技術研究所において, 位置データを活用した人口推計技術 (モバイル空間統計), ビッグデータ分析・活用に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



太田 賢 (正会員)

平成 10 年静岡大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。平成 11 年 NTT 移動通信網 (株) 入社。現在, NTT ドコモ先進技術研究所勤務。モバイルコンピューティング, 端末セキュリティ, 分散システムに関する研究に従事。共著『モバイルネットワーク』, 訳書『コンピュータネットワーク第 5 版』等。電子情報通信学会会員。本会シニア会員。