

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¹ 塚本 昌克¹ 太田 賢¹ 稲村 浩¹

概要: Bluetooth Low Energy (以下, BLE) タグを用いた端末の屋内位置推定に関して, 位置推定対象端末が位置推定実施エリア内に設置された 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おいては 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. 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ける平均推定誤差距離が 1.91m であり, 全ての BLE タグが観測できる状況と比較して 0.54m の低下に抑えられていることを確認した.

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システムに関する研究を行っている. 本稿では位置推定実施エリア内に設置された BLE タグの一部が電波観測不能となっ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 タグが観測できない場合においても平均推定誤差距離を 2m 以内に抑えられることを確認した.

近年, 屋内位置情報を利用したサービスが着目されている. サービスの具体例として, 駅構内や地下街でのナビゲーションや, O2O ソリューションにおける位置連動型情報配信, 顧客動線分析が挙げられる. 位置情報はコンテキスト・ウェア・コンピューティングにおける重要なユーザコンテキストとして認識されているが [1], 屋内位置情報の取得に関しては, デファクトスタンダードと言える技術が未だ確立されていない.

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 タグが着目されている. 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徴としている. その省電力性から, BLE タグはボタン型電池での稼働が可能であり, タグの設置場所には電源コンセントを必要とせず, 設置柔軟性に優れている.

その反面, BLE タグは電池電圧低下による電波送信の停

止や設置場所の意図しない移動等, BLE タグの障害による電波環境変化の発生頻度が高い. BLE タグの電波環境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と BLE タグ設置直後 (屋内位置推定システム導入時) の電波観測結果とが大きく異なってしまい, その結果, 位置推定性能の低下へと繋がる.

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, 位置推定実施エリア内に設置された全ての BLE タグを設置直後と同じ環境で動作させる必要があるが, その保守コストは無視できない. 我々の屋内位置推定システムでは, 位置推定性能を確保するために, 位置推定実施エリア内において高密度での BLE タグ設置を前提としている. BLE タグに障害が発生する度に保守を実施することは保守コストの増加へと繋がり, BLE タグを用いた屋内位置推定システム運用の課題である.

本研究では BLE タグに発生する障害の中でも特に, BLE タグの電池電圧低下や BLE タグ自体の故障が原因で BLE タグが電波送信を停止する事象に焦点を当てる. 一部 BLE タグの電波を観測できない場合においても位置推定性能の低下を抑制する手法を確立し, 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.

我々の屋内位置推定システムのユースケースとして, 商業施設における位置連動型情報配信や顧客動線分析を想定している. 商業施設の通路幅や棚幅を考慮すると, 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) を通過したと判定される. したがって, 本研究では推定誤差距離の目標値を 2m 以下としている.

以下, 本稿の構成について述べる. 2 章では近距離無線

¹ 株式会社 NTT ドコモ
NTT DOCOMO, Inc., Yokosuka, Kanagawa 239-8536,
Japan

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について説明を行った後、本システムにおける位置推定手法について述べる。4章では評価実験を行い、3章において提案した位置推定手法の耐障害性について考察を行う。最後に5章で本稿をまとめると共に、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 [2]。文献 [3] では Finger Printing と Triangulation を組み合わせた手法が提案されているが、我々の屋内位置推定システムでは 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、Proximity と Finger Printing の2手法について説明する。Triangulation は位置推定対象端末から3つの近距離無線通信デバイスまでの距離を計算し、位置推定対象端末の位置を一意に特定する手法である。次に、2.2 節において、耐障害性について検討してい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デバイスの直近に位置する時の位置推定性能が高いことが挙げられる。デメリットとして、BLE タグの設置されていない場所、もしくは、BLE タグを設置したが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挙げられる。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デバイスを密に設置する必要がある。

2.1.2 Finger Printing

Finger Printing とは、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、比較結果が類似してい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。Proximity と同様、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距離が小さくなるとい

うメリットがある。デメリットとしては、電波マップの作成コストが高いことが挙げられる。

Finger Printing の電波マップ作成コスト削減のための研究も行われている。文献 [4] 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を提案している。文献 [5] 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、事前測定のサンプル数を減らしても Finger Printing が動作することを示している。

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デバイスが全て正常に動作していることを前提としている。近距離無線通信デバイスに対して障害が発生し位置推定時の電波環境が事前に作成した電波マップから変化した場合、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、または、電波マップの再構築が必要である。

本節では電波マップ再構築のコスト削減に関する研究 [6], [7] について紹介する。文献 [6], [7] は、WiFi を用いた Finger Printing において電波マップ再構築のコスト削減を目的とした研究である。

文献 [6] 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 WiFi 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いながら WiFi の電波測定を行い、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常に最新の電波マップが得られるため、電波環境の変化が発生しても位置推定性能を維持することが可能となる。

文献 [7] 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測定結果を基に、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) [8] 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いながら WiFi の電波測定を行う。PDR による位置推定結果と WiFi の電波測定結果とを対応付け、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挙げると、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。電波マップ再構築のためだけに施設内を回遊する必要はなく、スタッフの稼働削減へと繋がる。

ここで紹介した文献 [6], [7] 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ことにより再構築のコスト削減へと繋げるというアプローチである。本研究は電波マップの再構築を必要とせず耐障害性を向上するアプローチをとる。

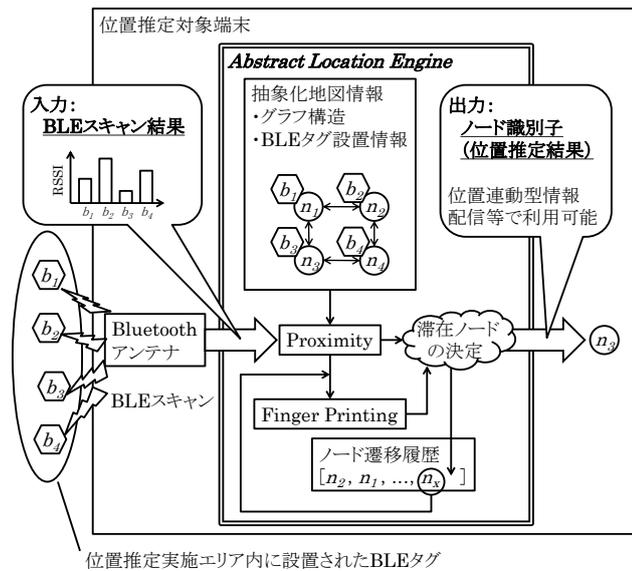


図 1 ALE のシステム概要

3. Abstract Location Engine

本章では我々の屋内位置推定システム Abstract Location Engine (以下, ALE) について述べる. 3.1 節ではシステムの概要について述べる. 3.2 節で ALE で用いる抽象化マップについて説明を行い, 3.3 節では, 抽象化マップにおける移動履歴を用いた探索空間の限定を行うことによって位置推定性能を維持するための手法について述べる.

3.1 システムの概要

図 1 に 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 タグの測定結果であり, 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, 位置推定時に BLE の測定を実施し, 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 タグの測定結果を受け取った 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, BLE タグの RSSI の一覧から現在滞在しているノードの推定を実施する. 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上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している.

ALE は位置推定対象端末の位置推定結果として, 上記ノード推定結果のノード識別子を出力する. 本出力結果に従って動作を変更するようなアプリケーションを実装することによって, 位置推定対象端末保持者に対して位置連動型のサービスを提供可能である.

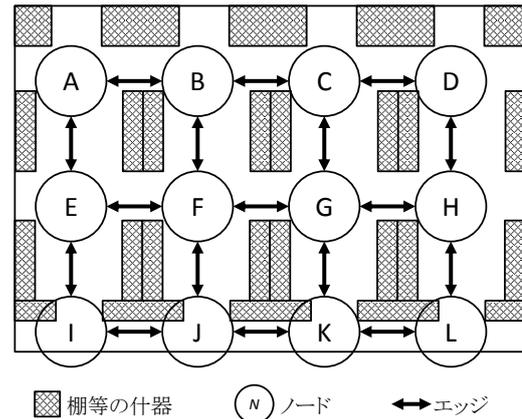


図 2 位置推定実施エリアマップと抽象化されたグラフ構造

3.2 抽象化地図情報

ALE では, 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上で出力する. ノードはある棚の前や通路の入り口, 交差点等, ある地点を指す. ALE の想定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に必要なとされる連続値でのピンポイントな位置座標の取得には対応しない.

抽象化された位置推定を行うために, ALE では抽象化された地図情報をシステム内部に保持している. その実体は実世界での通路情報をグラフ構造で抽象化したものである. 本システムは重み付きグラフ構造として抽象化された地図情報を内部に持ち, そのグラフ構造と直前の位置推定結果を基に位置推定の探索対象空間を限定することによって, 位置推定性能を向上させる.

図 2 は位置推定実施エリアの地図の例と, その地図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, 網掛けの箇所は什器が設置されており, 人が通行不可能であることを表している. 白抜きの箇所は什器が設置されておらず, 人が自由に通行可能であることを表している. 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が 12 個存在する. ALE では, 通路の交差点をノードとし, 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.

図 2 では, ○ で囲われた A から L がノードを表している. ALE では全てのノードに対して BLE タグの設置を前提としている. 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ている. 全ノードに対して BLE タグの設置をすることによって, 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細かい粒度で取得可能となる.

エッジはノード間の通路である. それぞれのエッジには, その通路の移動コストが重みとして与えられる. 移動コストとは, そのエッジを通過してノード間を遷移するた

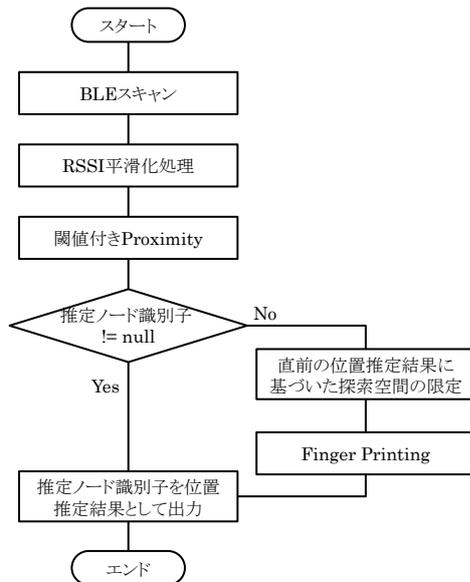


図3 ALEにおける位置推定処理のフローチャート

めに必要とされる値を表しており、移動コストが大きいほど通過するために時間がかかる。最も単純な移動コストとしてはノード間のユークリッド距離が考えられ、本稿でもエッジの重みとしてノード間のユークリッド距離を用いて評価実験を行った。

3.3 Finger Printing 手法における移動履歴に基づく探索空間の限定

図3にALEにおける位置推定処理のフローチャートを示す。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を組み合わせた位置推定を実施する。

2.1.1項で述べたように、Proximityは位置推定対象端末がBLEタグ直近に位置する時の位置推定性能は高いが、ノードに設置されたBLEタグの電波が観測できなくなった場合、該当ノードの滞在を推定することができない。Proximityは耐障害性が低く、耐障害性検討の余地がある。本研究では、Finger Printingと組み合わせることによって耐障害性の向上を検討した。

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。ただし、RSSIが事前に設定した閾値 th を超過した時のみProximityによる位置推定結果を出力することとし、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。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、RSSIの揺らぎによる位置推定性能の低下が問題となる。電波は障害物からの反射や

吸収の影響を大きく受けるため、同じ地点で電波測定を行ったとしても、観測結果のRSSIには揺らぎが発生する。RSSIの揺らぎは位置推定結果に影響を与えるため、平滑化することが好ましい。本研究では平滑化のためにローパスフィルタとして単純移動平均を用いることとした。

ALEではBLEの測定を1秒に1回行っている。ALEの動作プラットフォームとして想定しているAndroid端末では、1回の測定結果として、1つのBLEタグから複数のRSSIが返り値として得られる*1。時刻 t におけるBLEタグ b のRSSIの測定結果数を $num(t, b)$ と定義し、時刻 t の測定結果におけるBLEタグ b のRSSIを $\{rssi_{t,b,1}, rssi_{t,b,2}, \dots, rssi_{t,b,num(t,b)}\}$ と定義すると、時刻 t におけるBLEタグ b からの単純移動平均 $MA_RSSI_{t,b}$ は、下記の式によって計算できる。

$$MA_RSSI_{t,b} = \frac{1}{\sum_{p=t-k}^t num(p, b)} \left(\sum_{p=t-k}^t \sum_{q=1}^{num(t,b)} rssi_{p,b,q} \right)$$

ここで k は移動平均を計算するための窓幅(秒)である。窓幅が小さいと十分な平滑化の効果が得られず推定誤差距離が大きくなり、窓幅が大きいと位置推定の遅延に繋がる。本研究では $k=3$ としたが、窓幅の適切な値に関しては更なる検討が必要である。

測定結果に含まれる全てのBLEタグのRSSIに対して上記単純移動平均を計算した後、次項以降で述べる位置推定を実施する。

3.3.2 Proximity による基準位置の決定

平滑化処理結果に基づきProximityによる滞在ノードの推定を実施する。平滑化した結果のRSSI R_B を、 $R_B = \{b \in B | MA_RSSI_b\}$ と定義する。ここで B はBLE測定結果に含まれていた全てのBLEタグの集合を表す。位置推定対象端末の滞在ノード $stay_n$ は、下記式によって決定できる。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。

$$stay_n = \begin{cases} node(\arg \max_b R_B) & \text{if } \max_b R_B \geq th \\ \text{null} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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タグの設置されているノードの識別子を位置推定対象端末の滞在位置として出力する。最大である単純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。

閾値 th を高めに設定することによって、Proximityによる推定誤差は大幅に軽減可能である。ただし、Proximity

*1 測定結果数は端末搭載のBluetoothのチップセットやドライバに依存しており、端末によって異なる。本稿の実験で用いたXperia™ Z2 Tabletでは、1回の測定につき1つのBLEタグから3~5の測定結果が得られた。

によって位置推定結果が出力される回数が大幅に軽減する。すなわち、適合率が向上し再現率が低下する。ALEの位置推定手法は、Proximityによる位置推定がシステム全体の位置推定誤差に影響を与える。ALEで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誤差を小さく位置推定できれば、システム全体としての推定誤差を大きく軽減可能である。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4.2節にて詳しく述べる。

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、Proximityによる位置推定結果は出力されず、Finger Printingによる位置推定を実施する。Finger Printingによる位置推定は、 k 近傍法による分類問題として定式化できる。それぞれのBLEタグのRSSIの単純移動平均の結果を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 個の訓練例を求めればよい。

Finger Printingの位置推定において、BLEタグの電波が一部観測不能となった場合、本研究では特徴ベクトルの次元数を削減した上で、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 $\{r_{b1}, r_{b2}, r_{b3}, r_{b4}, r_{b5}\}$ というサンプルが記録されたとする。ここで、 $bn(n=1, 2, \dots, 5)$ はそれぞれ異なるBLEタグを、 r_{bn} はBLEタグ bn のRSSIを表している。位置推定を実施するタイミングにおいて、 $\{s_{b1}, s_{b2}, s_{b5}\}$ という電波が観測できたとする。これは、 $b3$ と $b4$ 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、サンプルのベクトル v を $v = [r_{b1}, r_{b2}, r_{b5}]$ 、観測ベクトルを w を $w = [s_{b1}, s_{b2}, s_{b5}]$ として扱い、ベクトル v, 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。本研究では移動履歴に基づき探索空間を限定することにより、特徴ベクトルの次元数削減に起因する位置推定性能の低下を抑制する。実運用において想定されるBLEタグの障害としては、BLEタグの故障や劣化による電波観測不能以外にも、BLEタグの意図せぬ場所への移動、電池電圧低下による電波出力低下が挙げられる。障害が発生したBLEタグの識別子を発見できれば、該当BLEタグのRSSIを特徴ベクトルから削除して電波観測できなかったものとして扱ったとしても、同様に位置推定性能の低下を抑制できることが期待できる。

提案手法では、Finger Printingによる位置推定時には、直前の位置推定結果に基づき探索空間を限定する。時刻 t におけるFinger Printingによる位置推定を考える。直前のノード遷移（異なるノードへ移動すること）の時刻を $t-\alpha$ とし、時刻 $t-\alpha$ における滞在ノードを $stay_{n_{t-\alpha}}$ とする。ノード $stay_{n_{t-\alpha}}$ から α 時間内に遷移可能なノードを求める。そのためには、グラフ構造のエッジに対して与

えられた重みと、人の平均移動速度 v を用いればよい。

ノード間のエッジは、そのエッジが表す通路を移動するために必要なコストを重みとして持つ。具体的には、ノード x, y が存在する場合、ノード x, y 間の距離を基準とした指標がノード x, y 間のエッジ $e_{x,y}$ の重み $w_{x,y}$ として用いられる。 $w_{x,y}$ を人の平均移動速度 v で除算することにより、ノード x, y 間の移動に必要な時間 $t_{x,y}$ を算出できる。 $t_{x,stay_{n_{t-\alpha}}} \leq \alpha$ であるノード $x \in X$ が遷移可能ノードであり、 X 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の実験を行った。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、BLEタグの電波が観測できない状況における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4.2節で、提案手法の耐障害性評価実験に関しては4.3節で述べる。

4.1 実験環境

BLEタグとして、株式会社芳和システムデザインのBLEAD[®]*2を使用した。BLEADはAppleのiBeacon[®][9]として動作するBLEタグであり、そのビーコンパケット送信間隔は100msである。それぞれのBLEタグを高さ約0.8m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。

位置推定対象端末として、SONYのXperia[™]Z2 Tabletを利用した。OSバージョンは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、観測した時刻の3つをセットとし、BLE測定ログとして記録している。また回遊試験中には、正解データとして、各BLEタグに最接近した時にその時刻とBLEタグの設置されたノード識別子を記録した。

図2は本実験環境のエリアマップとグラフ構造を示している。本実験では12個のBLEタグを、4.4m間隔で 3×4 の長方形となるように設置した。各エッジの移動コストはBLEタグ間のユークリッド距離4.4を与えた。本環境はBLEタグを数百個設置するような大規模な実運用環境のサブセットを想定した。Bluetoothによる位置推定誤差は数m程度と言われている[2]。その誤差は本実験環境に収まる規模であり、本実験環境はBLEタグを用いた位置推定システムの性能を評価するための環境として妥当である。

また、回遊試験の経路として、

- 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。AからLの記号は、図2にお

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

るノードを表している。

被験者は回遊試験中は等速歩行しているため、正解データは下記のように扱った。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。この場合における時刻 t_x における正解ノードは、 $t_a \leq t_x \leq \frac{1}{2}(t_a + t_b)$ である場合はノード n_a 、 $\frac{1}{2}(t_a + t_b) < t_x \leq t_b$ である場合はノード n_b とした。

4.2 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 -62dBm に決定した。

先ほど述べた 3 パターンの試験経路をそれぞれ 5 回ずつ、計 15 回の回遊試験により得られた BLE 測定ログと正解データを用いて、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 -70dBm から -50dBm 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能を算出した。位置推定性能の指標として、適合率 P 、再現率 R 、F 値 F を調査した。ここでの適合率 P とは、Proximity が出力した位置推定回数を母数とした時の、正解出力数の割合である。再現率 R とは、本来システムが出力すべき回数を母数とした時の、正解出力数の割合である。ALE では 1 秒に 1 回位置推定を実施するため、試験実施時間 (秒) が再現率の母数と等しい。F 値 F は、適合率 P と再現率 R の調和平均である。

また、参考値として、平均推定誤差距離 E を調査した。ここでの平均推定誤差距離 E は、RSSI が閾値を超え、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。本稿では平均推定誤差距離 E を下記の式で定義する。

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

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 4 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 値が減少していることが確認できる。また、平均推定誤差距離も減少していることが確認できる。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

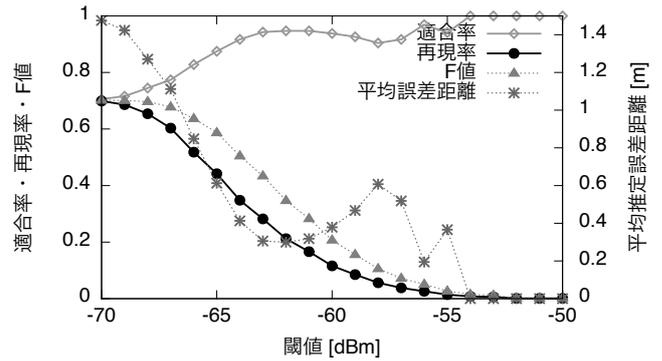


図 4 Proximity における閾値と位置推定性能

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と考えられる。平均推定誤差距離に関しても同様の理由で、 $-61 \leq th < -54$ の間で増減が目立っている。

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することが可能である。しかし本稿では、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、回遊試験の回数を増加させるための追加試験を実施していない。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、 -62dBm 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時のみ 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 4.4m を約 0.8m/s で移動したため、ノード間の移動には約 5.5 秒かかる計算になる。すなわち、5.5 秒間隔で BLE タグの直近を通過したことになり、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 $1/5.5 \approx 0.18$ となる。

再現率は閾値 th の増加に伴い単調減少しており、 $th = -62$ では 0.212、 $th = -61$ では 0.166 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、 $th = -62$ とした時の適合率は 0.94、平均推定誤差距離は 0.30m であり、その位置推定性能は非常に高い。

4.3 提案手法の耐故障性評価実験

次に、提案手法の耐故障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。本実験結果から、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。

予備実験と同様、3 パターンの試験経路をそれぞれ 5 回ずつ、計 15 回の回遊を行い、BLE 測定ログと正解データを収集した。得られた BLE 測定ログから特定の BLE タグ

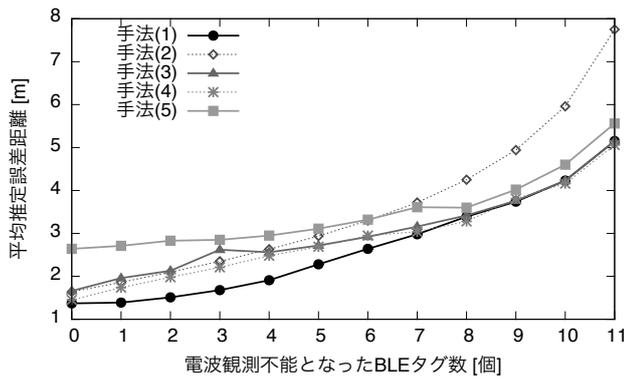


図5 電波観測不能となったBLEタグ数と位置推定性能

から発信された電波のログを削除することによって、擬似的に一部BLEタグの電波を観測不能となったBLEログを作成して位置推定性能を計測した。電波を観測不能となったBLEタグを0個から11個の間で変化させ、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タグの電波を観測不能となる状況を想定した場合、その組み合わせは全部で ${}_{12}C_n$ 通りが考えられるが、本研究ではそれら全パターンを評価した。

4.3.1 耐障害性評価のための比較結果

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1.91mに抑えられることを確認した。

図5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）である。図5の手法(1)から(5)は、下記手法を表している。手法(1) 閾値あり Proximity + 探索空間限定 Finger Printing (提案手法)

手法(2) Proximity

手法(3) Finger Printing

手法(4) 閾値あり Proximity + Finger Printing

手法(5) 探索空間限定 閾値あり Proximity + 探索空間限定 Finger Printing

(1)は本稿の提案手法である。比較のために(2)から(5)の評価も実施した。(2)と(3)は既存の屋内位置推定手法単体での利用、(4)は(2)と(3)を組み合わせた手法、(5)は(1)の提案手法に加え、Proximityによる位置推定時にも前回の位置推定結果を基に探索空間を限定する手法である。

(1)から(5)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しているが、本稿での提案手法(1)では、平均推定誤差距離の増加が最も緩やかであることが確認できる。全てのBLEタグの電波が観測できている時、すなわち、電波環境に変化がない場合においては、(1)1.37mと(4)1.45mがほぼ同等の性能を示している。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1.74mとなり一気に0.29m性能低下したにも関わらず、(1)の平均推定誤

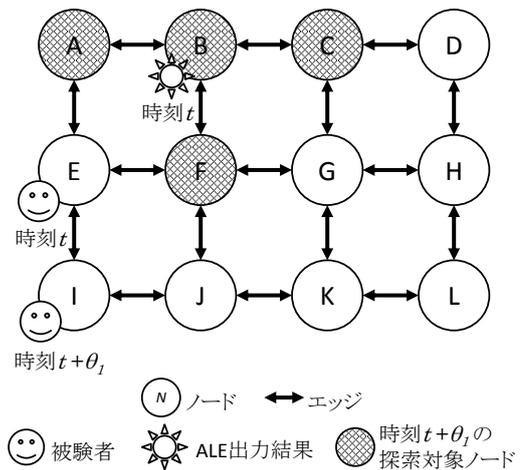


図6 探索空間の限定によって位置推定性能が悪化する例

差距離は1.39mであり、0.02mの低下に抑えられている。

(1)では4つのBLEタグの電波が観測不能となった場合でも、平均推定誤差距離が1.91mに抑えられている。ALEの商業施設での利用を考えた場合、商品の棚前でその商品に関する広告やクーポン等の情報配信を行うことが想定されるが、推定誤差距離が2m以上発生した場合、商業施設によっては異なる通路（棚前）を通過したと判定される。つまり、異なる通路の商品に関する情報の誤配信へと繋がる。他の手法ではBLEタグを2個紛失した時点で平均推定誤差距離が2mを超過しており、本手法によってBLEタグの保守タイミングを遅らせることができる。

(1)ではBLEタグの紛失数が4個を超えた辺りから平均推定誤差距離の増加が大きくなっており、紛失数が7個となった時点で、(4)とほぼ同等の平均推定誤差距離となった。以上より、提案手法は位置推定システムの耐障害性を向上できたと言える。

4.3.2 探索空間限定の有効性に関する考察

提案手法(1)は手法(5)と比較し、BLEタグが全て観測可能である場合の平均推定誤差距離が1.27m小さく、Finger Printingのみ探索空間を限定することの有効性を確認した。

図5に示した実験結果から、BLEタグの紛失数が0から7の間では、手法(5)は他手法と比較して性能が大きく劣っていることが分かる。これは、誤った位置推定結果を基に探索空間を限定してしまった結果、探索対象の中に正解ノードが含まれなくなってしまったため、また、その事象が連続して推定誤差距離が累積してしまったためである。

誤った位置推定結果を基に探索空間を限定することによる性能悪化の例を図6に示す。図6において○で囲われた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している。時刻 t において位置推定対象端末が実際にはノードEに存在していたにも関わらず、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 θ_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。 θ_1 内に移動可能な距離を 1 エッジ分とした場合、時刻 $t + \theta_1$ に移動可能であるノードは、図 6 で網掛けで示したノード 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、必ず誤判定となってしまう。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。

以上のように、誤った位置推定結果を基に探索空間の限定を行うことにより、推定誤差距離が累積して性能が著しく悪化することが想定される。予備実験により、閾値 $th = -62$ とした際の Proximity による位置推定の適合率は、0.95 超であることが判明している。Proximity に関しては前回の位置推定結果をもとに探索空間を限定せずに位置推定を行うことによって、上記問題を回避することが可能であることが、本比較実験から考察できる。

5. おわりに

本稿では、BLE タグを用いた屋内位置推定システムの耐障害性について述べた。高密度での BLE タグ設置を前提とする我々の屋内位置推定システムでは、BLE タグの保守コストが課題である。電波を観測できなくなった BLE タグが発生する度に保守を実施することは保守コストの増加に繋がるため、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目的として研究を行った。

位置推定対象端末によって観測された RSSI を基に、Proximity と Finger Printing を組み合わせて位置推定を行う手法を提案した。提案手法では RSSI が閾値を超過した場合のみ Proximity による位置推定を実施し、それ以外の場合には、前回の位置推定結果を基準として探索空間を限定した上で、Finger Printing による位置推定を実施する。

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。本稿では、実験室環境に設置された 12 個の BLE タグを対象に評価を実施した。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 2m 以内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 2m を超過しており、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、保守コストの削減へ貢献できる。今後は平均推定誤差距離を更に低下させ、推定誤差距離が 2m 以上発生する頻度を下げる必要がある。

本稿では 12 個の BLE タグを対象に評価を実施した。本実験における BLE タグの設置環境は、設置“密度”という観点からは十分であるが、大規模な実運用を想定した場合、設置“個数”という観点ではかなり少ない。大量の BLE タ

グが設置された実運用環境においても有効性を確認することが必要であり、今後の課題とする。

本研究では一部 BLE タグの電波が観測できなくなるという障害に着目し、耐障害性の検討を実施した。特徴ベクトルの次元数を削減しても上手く動作することが確認できた。今後は BLE タグの移動や電池電圧低下による出力低下等、他の障害にも対応する必要がある。障害が発生した BLE タグの識別子を発見できれば、該当 BLE タグの RSSI を特徴ベクトルから削除して、電波観測できなかったものとして扱えばよい。それらの BLE タグの識別子を発見する手法の確立についても、今後の課題とする。

参考文献

- [1] Abowd, G. D., Dey, A. K., Brown, P. J., Davies, N., Smith, M. and Steggle, P.: Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness, *Proceedings of the 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, HUC '99, London, UK, Springer-Verlag, pp. 304–307 (online), available from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=647985.743843> (1999).
- [2] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P. and Liu, J.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, Vol. 37, No. 6, pp. 1067–1080 (online), DOI: 10.1109/TSMCC.2007.905750 (2007).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Pei, L., Chen, R., Liu, J., Tenhunen, T., Kuusniemi, H. and Chen, Y.: Inquiry-Based Bluetooth Indoor Positioning via RSSI Probability Distributions, *Proceedings of the 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).
- [6] 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, *Sensors, 2009 IEEE*, pp. 1463–1466 (online), DOI: 10.1109/ICSENS.2009.5398451 (2009).
- [7] 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).
- [8] Beauregard, S. and Haas, H.: Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning, *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp. 27–35 (2006).
- [9] Apple: Getting Started with iBeacon, (online), available from <https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf> (2014).