

BLE ビーコンによる経路推定のための ビーコンネットワーク生成手法の提案と評価

安藤 祥太¹ 梶岡 慎輔¹ 山本 大介¹ 高橋 直久¹

概要：我々の研究室では、BLE ビーコンを用いたグローバルマップマッチングによるユーザの移動経路・滞在推定手法を提案してきた。これらの研究では、ビーコンネットワーク、経路ネットワークと呼ばれる二つのネットワークを作成することで移動経路・滞在推定を行っているが、推定を行う際、ノードやリンクといったネットワークの情報は、事前にユーザが手動で入力する必要があった。そこで本論文では、2つのネットワークのうち、ビーコンネットワークについて、そのトポロジーの作成を自動化するシステムを提案する。提案システムは、Android アプリケーションにより収集したデータを入力とし、ビーコンネットワークのノード、始点ノードと終点ノードを保持したリンクテーブルを出力する。ノード情報は、アプリで取得したビーコン ID をそのまま用いることで、また、リンク情報は時間的側面を考慮した方法と、受信信号の強度を利用した方法を用いることで、ビーコンネットワークの作成を実現した。本論文では、提案システムとその実現方法について述べ、プロトタイプを実装した。また、プロトタイプを用いて生成されたネットワークトポロジー、設定したパラメータに関して評価実験を行い、その結果について考察する。

Beacon Network Generation Method for Route Estimation with BLE Beacon and its Evaluation

SHOTA ANDO¹ SHINSUKE KAJIOKA¹ DAISUKE YAMAMOTO¹ NAOHISA TAKAHASHI¹

1. はじめに

近年、Bluetooth Low Energy(以下、BLE)規格を搭載したスマートフォンなどの機器の普及が進んでいる。それに伴い、BLE通信を利用したサービスや、iBeacon・EddystoneといったBLEビーコン(以下、ビーコン)を用いたサービスが多く見受けられるようになってきた。その例として、モバイルメッセンジャーアプリ「LINE」が提供する「LINE Beacon」[9]や、名古屋工業大学で運用されている打刻システム「Nitech ピロリン」[10]などがある。「LINE Beacon」はビーコンの発する電波を取得し、ユーザの位置を特定することで、LINE ユーザに商品情報やクーポンを送信している。「Nitech ピロリン」は、講義室内にあるビーコンから発せられる電波を利用しており、ユーザの端末にインストールされたアプリケーションの打刻ボタン(図1)を押す

ことで、講義の出席を確認することができる。これらのアプリケーションやサービスではビーコンが発する信号の受信信号強度(以下、RSSI)を基に位置推定が行われている。

また、BLEの位置推定技術を利用し、ユーザの移動を追跡することで、行動の可視化・分析を行うサービスも普及しており、マーケティングや業務の効率化など、様々な分野へ応用されている。例えば、ショッピングセンターにおいては、顧客の移動経路、滞留ポイント・時間等を可視化することにより、特定のエリアへの人の流れが少ないことや、特定の階層には人が滞在しやすい、といったことが把握できる。このような情報から、新たに動線を引く等の改善策が見え、顧客の増加や販売促進につなげることが可能になる[13]。また、オフィスや工場においては、従業員やフォークリフト等の産業車両の動きを可視化することで、作業効率や物品・資材の配達効率を上げ、生産性を上げることが可能になる[14]。

¹ 名古屋工業大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology



図 1 Nitech ピロリン画面例

ビーコンを用いたユーザの位置推定手法の1つとして、我々はグローバルマップマッチングによるユーザの移動経路・滞在推定手法を提案してきた。この手法はビーコンネットワーク、経路ネットワークと呼ばれる2つのネットワークを用いた推定手法であり、スマートフォンアプリを用いて受信したビーコンデータから、ユーザの位置候補を算出することで、移動経路・滞りを推定している。このプロトタイプシステムでは、推定にあたり、ビーコンの設置関係を考慮したビーコンネットワークと、構内経路をモデル化した経路ネットワーク、これら2つのネットワーク情報を事前に手動で入力しておく必要がある。そのため、推定をしたいユーザが煩わしさを感じる可能性がある。また、ネットワークの規模が大きくなるにつれ、その作業はさらに煩雑となる。

そこで、本研究の目的は、2つのネットワークのうち、特にビーコンネットワークのトポロジー作成を自動化する手法を提案することである。これにより、移動経路・滞在推定をする際の事前準備を減らすことが可能になるため、手軽な推定が可能になる。上記の目的を達成するための課題とそれに対するアプローチを以下に示す。

課題 1 ビーコンから得られる信号には、他ビーコンとの接続関係の情報が含まれていない。この課題に対しては、取得データの時系列情報を用いて、接続関係(リンク)を構築することで解決する。

課題 2 室内においてビーコンから得られる受信信号強度(RSSI)は不安定である。この課題に対しては、ビーコンデータの統合・フィルタリングによる補正により解決する。

2. 関連研究

文献[1]では、BLE ビーコンを用いたグローバルマップマッチングによるユーザの移動経路・滞在推定手法として、BST-Matching と呼ばれる手法を提案している。これは、GPS を用いた経路推定で利用される Global Map Matching の手法の1つである ST-Matching をビーコン向けに改良した手法である。位置推定の系列から経路推定を

する従来の方法と異なり、経路推定の結果からある時刻における位置を決定するため、位置推定の精度に左右されない高精度な経路・滞在推定を可能にした。

また、その研究の一部として、屋内マップ上にビーコン・経路ネットワークをグラフィカルに構築可能なソフトウェアの開発を行っていた。画面に表示されているマップの一点をクリックした際、クリックした地点にノードが設置される。また、設置されたノードを2つ選択し、画面上にあるリンクの設定ボタンをクリックすることで、これらのノード間にリンクが設定される。

文献[5]では、COVID-19 感染対策を目的とした位置情報インフラの構築を目指し、大学構内の学生の位置情報を BLE ビーコンを用いて取得し、その値を基に各教室・施設の混雑度をアプリケーション利用者に提示するシステムを提案している。

3. 提案システムの概要

3.1 提案システムの構成図

提案システムの構成図を図2に示す。

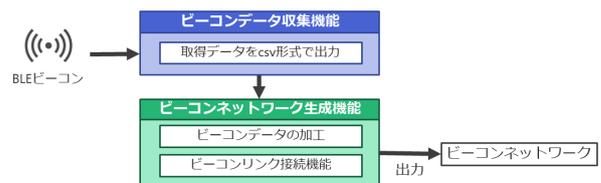


図 2 システム構成図

3.2 提案システムで利用する Android アプリケーション

提案システムの入力として使用するビーコンデータの収集には、先行研究[1]にて開発されたビーコンログ収集アプリケーションを改変したものを用いる。図3はアプリケーションの画面例である。端末のBluetooth設定をONにし、アプリケーションを起動することで、ビーコンデータの収集が始まる。取得したデータはアプリケーション側で保持しており、画面上のUPDATE ボタンをタップすることで、その時点までに取得したデータ一覧を画面に表示する。また、取得データは csv ファイルにて書き出される。

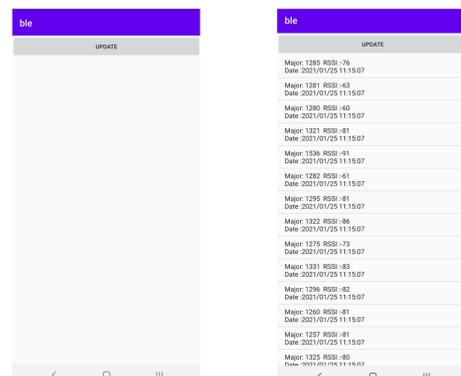


図 3 収集アプリケーションの画面

3.3 提案システムの機能

3.3.1 ビーコンデータの補正

Android アプリケーションにて収集されたデータを、課題 2 で述べた RSSI の不安定さを解決するために、また、後のビーコンリンク生成時に扱いやすいよう、データの補正を行う。補正には次の 3 つの手法が用いられる。

1. ビーコンデータの取得時刻情報を利用したデータ統合
2. RSSI 値を利用したソート
3. RSSI 値を利用したフィルタリング

3.3.2 ビーコンリンク推定機能

補正により得られたデータを利用し、各ビーコンノード間に、以下の 2 つの手法を用いてリンクを生成する。

手法 1 時系列情報 (ビーコンの検出時刻) を考慮した方法

手法 2 同時刻データにおける RSSI 値を利用する方法

これら 2 つの方法の詳細については次章で述べる。そして、生成されたビーコンネットワークのノード・リンク情報を出力する。

4. 提案システムの実現方法

前章で挙げた各機能の実現方法を以下に示す。

4.1 ビーコンデータの補正

Android アプリケーションにて収集したデータを、先行研究 [1] にて用いられていた手法を基に補正する。ビーコンデータは、一定個数ごとの統合とフィルタリングにより補正される。まずは、統合手法について説明する。収集したデータは、それぞれデータの検出時刻を保持しており、その時刻にて検出されたビーコンの ID と RSSI の組を持つ。以下の手順により統合が行われる。

1. ビーコンデータを時刻の古い順に、 i 個ずつに分割する。
2. 分割したデータ群からビーコン ID と RSSI の組を取り出し、1 つのビーコンデータとして統合する。ただし、同一のビーコン ID が存在する場合は、RSSI が最大のデータのみ残す。
3. 統合されたデータ群を RSSI が大きい順にソートし、分割されたデータ群のうち最新の時刻を割り当てる。
4. 2, 3 を分割したビーコンデータすべてに適用する。

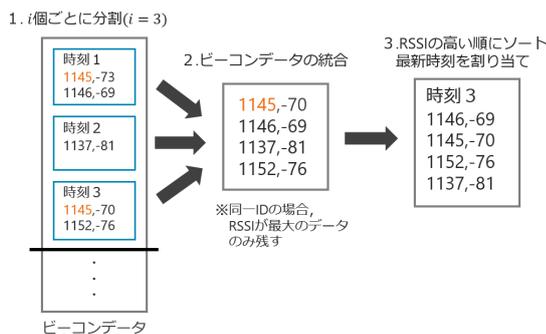


図 4 ビーコンデータの統合例, [1] より引用し一部改変

次に、フィルタリングについて説明する。フィルタリングは、統合されたビーコンデータに対して、RSSI が設定したしきい値を下回った場合に、その RSSI 値を持つビーコン ID とともにデータを除去する形で行われる。

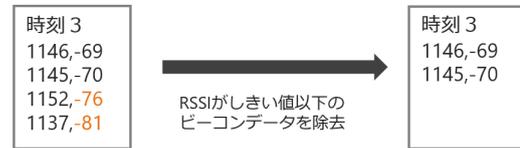


図 5 ビーコンデータのフィルタリング例

4.2 ビーコンリンク推定機能

前章にて挙げた 2 つのリンクの推定手法について、その詳しい処理を以下に示す。

4.2.1 時系列情報を考慮した方法

ビーコンデータの補正で得られたデータのうち、ある時刻 t と $t-1$ において、最も大きな RSSI 値を持つビーコンノード間にリンクを生成する手法である (図 6)。Android アプリケーションを用いたビーコンデータの収集は、徒歩で行われており、あるビーコンから去り、別のビーコンへと近づくことを繰り返している。また、この事象が短時間のうちに行われた場合、それらのビーコンは物理的に近い関係を持っていることを示唆する。そのため、これらのビーコンノード間にリンクを生成する。

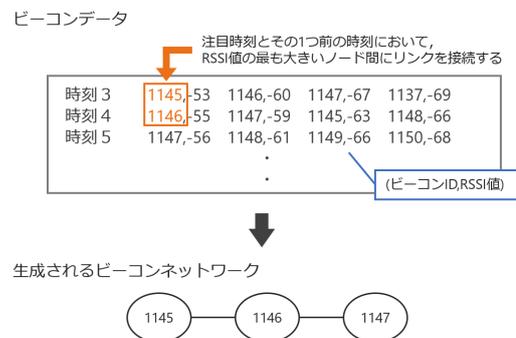


図 6 時系列情報を考慮したリンク接続方法

4.2.2 同時刻データにおける RSSI 値を利用する方法

ビーコンデータの補正で得られたデータのうち、ある時刻 t において、最も大きな RSSI 値を持つビーコンノードと、次に大きな RSSI 値を持つビーコンノードの間にリンクを生成する手法である (図 7)。ビーコンの発する信号に不安定さがない場合、ユーザは、最も大きな RSSI 値を取得したビーコンの近くに立つ。その地点で得られる RSSI 値が 2 番目に大きなビーコンは、最も大きな RSSI 値を持つビーコンと隣接している可能性が高い。そのため、これらのビーコンノード間にリンクを生成する。

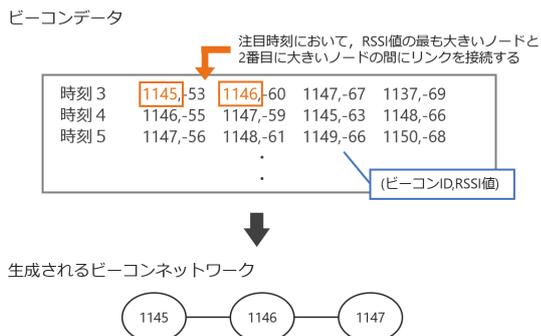


図 7 同時刻データにおける RSSI 値を利用する方法

5. プロトタイプシステム

第 4 章の実現方法に従ってプロトタイプシステムを作成した。システムは Java プログラムであり、javac によるコンパイル後、java コマンドにより動作する。コマンド実行の際、引数としてビーコンネットワーク生成に利用したい csv ファイルのパス指定が必要である。ビーコンデータ収集用アプリケーションでは、データ収集が始まるとスマートフォン内に csv ファイルを作成し、そこに収集データを書き込んでいく。この csv ファイルをシステムが実行可能な環境へ移し、そのパスを引数としてプログラムを実行すると、同ディレクトリ内に、ノード情報とリンク情報からなるビーコンネットワーク情報が csv 形式で出力される。

また、提案システムのほかに、次章の評価実験にて、RSSI 値が不安定でないビーコン設置環境にて得られるデータを比較対象として用意するために、シミュレーションシステムを開発した。このシステムの画面を図 8 に示す。システムを起動後、まず画面下の仮想マップに仮想ビーコンを設置する。その後、データ収集を始めたい位置にマウスカーソルを置き、データ収集を始める。収集が始まると、1 秒ごとにその時点でのマウスカーソルの位置から得られる各仮想ビーコンからの RSSI が算出され、画面下部に表示される。データ収集終了後、そのデータが csv ファイルとしてダウンロード可能になる。この csv ファイルは、Android アプリケーションで得られる csv ファイルと同じ形をしているため、そのまま提案システムの入力として使用できる。

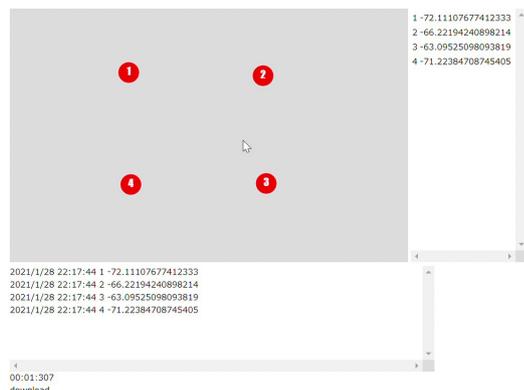


図 8 シミュレーションシステム動作画面

6. 評価実験

6.1 評価実験の目的

本実験の目的は、プロトタイプシステムを用いて、手作業で作成したビーコンネットワーク（従来手法）と提案システムによって推定されたビーコンネットワークの一致率に基づいて、ビーコンネットワークの推定精度を検証することである。

6.2 評価実験の方法

6.2.1 パラメータの設定

- 4.1 項, ビーコンデータの統合数 $i=1\sim 6$
- 4.1 項, フィルタリング 取得した RSSI 値 > 70 の場合, データは除去する。

6.2.2 実験環境

本実験は、名古屋工業大学 53 号館 1 階 5214 教室、2 階 5224 教室、3 階 5234 教室を対象に、教室には誰も人がいない状況で行った。また、ビーコンは故障しておらず、どのビーコンからもデータが取得できることを事前に確認している。

6.2.3 実験方法

実験には、6.2.2 の環境にて得られるビーコンデータと、第 5 章のシミュレーションシステムにて得られるビーコンデータを用いる。それぞれの環境において、次の 3 種類の経路（図 9）を止まることなく歩いて収集したビーコンデータを用いる。

経路 1 手作業で作成したビーコンネットワーク（以下、正解ビーコンネットワーク）のすべてのリンク上を歩く

経路 2 正解ビーコンネットワークの一部のリンク上を歩く

経路 3 手作業で作成した経路ネットワーク（以下、正解経路ネットワーク）上を歩く

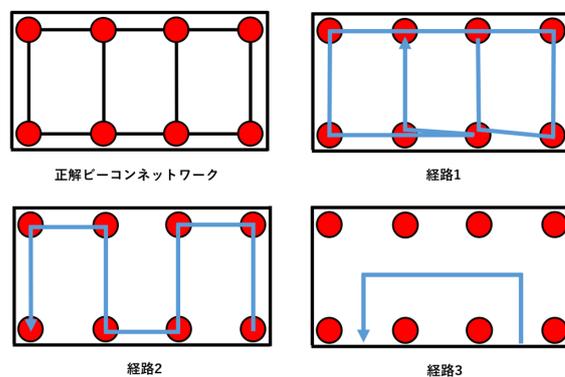


図 9 正解ビーコンネットワークと実験に使用する 3 種類の経路

また、データの収集はそれぞれ 5 回ずつ行い、その平均値を結果として用いる。

6.3 評価尺度

本実験にて推定されるビーコンネットワーク情報のうち、推定したリンク情報の評価尺度として、以下の4つの尺度を用いる。

- 適合率
推定したビーコンネットワークにて接続していたリンクのうち、正解ビーコンネットワークでも接続されているリンクの割合
- 再現率
正解ビーコンネットワークで接続されているリンクのうち、推定したビーコンネットワークでも接続されているリンクの割合
- F 値
再現率と適合率の調和平均
- 編集距離
推定したビーコンネットワークと正解ビーコンネットワークがどの程度異なるかを示す指標。先行研究 [1]にて開発されたネットワーク構築システムを用い、推定したビーコンネットワークを正解ビーコンネットワークと等しくなるよう修正する際にかかるコストを算出する。先行研究のシステムにおいて、ノード間に1つのリンクを追加する際には、2つのノードをクリックで選択する必要があるため、1つのリンクを削除するには、対象のリンクをクリックで選択することから、編集距離に用いるコストは次のように設定する。
 - － リンクを1つ追加する：コスト 2
 - － リンクを1つ削除する：コスト 1算出された編集距離が 0 の場合、推定したビーコンネットワークと手作業で作成したビーコンネットワークは同等のもの、といえる。また、どのリンクもつないでいない状態から、正解ビーコンネットワークの状態まで修正するのにかかるコスト (編集距離) は 20 である。

また、ビーコンネットワークについて、理想的なビーコンネットワークは、リンクが交差することのないネットワークであるが、図 10 左のようなネットワークでも、大まかに見れば隣接したノード同士が結べているため、求めているネットワークとして間違いではない。そこで、このように部屋の壁方向と平行ではないリンク (以下、斜めのリンク) を不正解のリンクと判定しない、つまり正解ビーコンネットワークの条件を緩くした場合の適合率・再現率・F 値・編集距離も算出する。ただし、図 10 右のように1つ以上のノードを飛ばして接続するようなリンクは隣接したノードを結べているとは言えないため、緩くしたネットワークの条件には含まれない。

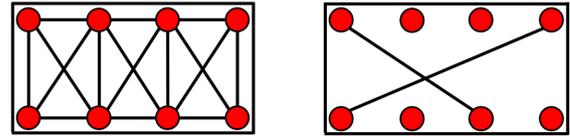


図 10 条件ビーコンネットワーク

6.4 結果と考察

実験対象の教室の1つである 5214 教室の、各経路における編集距離の結果を図 11~13 のグラフで示す。

まず、経路 1 の実環境における編集距離について、統合数 1 の値をのぞく、2~6 の統合数において、提案手法を用いない場合よりもユーザの作業量が削減できているかの基準となるコスト 20 を下回っていることが確認できる。特に、統合数 4 においては、条件を緩くしない場合にはおおよそ 15 まで、条件を緩くした場合にはおおよそ 10、つまり提案手法を用いない場合の 1/2 程度まで作業量を減らせることが確認できる。このように編集距離が抑えられた要因の1つ目として、ビーコンデータの統合があげられる。第 1 章の課題 2 でもあげた通り、室内においてビーコンデータから得られる RSSI は不安定である。そのため、統合数 1、つまりビーコンデータを統合していない場合の編集距離は、統合した場合の編集距離に比べ、高い値をとっていることが確認できる。また、グラフを観察すると、その形はおおよそ下に凸の曲線を描いており、その最下点は統合数 2~4 における値である。この統合数は、人の平均的な歩行速度が 2.0m/s であることから、約 4~8m 歩いた分のデータが統合されていることを表し、この距離は、今回の実験環境において、おおよそ 1~2 つのビーコンノードをまたぐ距離である。そのため、統合数 2~4 で編集距離が小さくなることは妥当であり、またビーコンデータの統合が RSSI の不安定さを解消することに有効であると考えられる。ただし、教室の大きさやビーコン間の距離が変わってしまえば、最適な統合数の値も変わってくる。そのため、提案手法をより実用的なものにするためには、ビーコンデータを収集するタイミング等で、ビーコン間の距離や教室の大きさを算出し、そこから最適だと思われる統合数を提案するような工程が必要であることが考えられる。編集距離が抑えられた要因の2つ目として、適合率に比べ、再現率が高い値をとっていることがあげられる。適合率と再現率はトレードオフの関係にあり、再現率を高くするためにリンクをより多く接続しようとする、ユーザの意図していないリンク (不正解リンク) が混ざる可能性が高くなり、適合率は下がる傾向にある。一方、適合率を高くするため、不正解リンクが混ざらないような厳しい条件を設定すると、正解リンクまでも棄却してしまう可能性が高くなり、再現率は下がってしまう。また、今回の実験におい

て、編集距離のコストは、リンクを追加する場合には 2、削除する場合には 1、に設定されており、リンクを削除する方が、ユーザの作業量は少なく済む。そのため、同じ数だけリンクが過不足する場合、正解リンクが足りないよりも、不正解リンクが多いほうが、ユーザの負担が少なく済む。つまり、適合率よりも再現率をなるべく高くする方針の方が、編集距離は小さくできる。これを踏まえると、再現率が高く、適合率が低いという実験結果が、編集距離の削減に影響を与えていると考えられる。シミュレーションシステムで得られる経路 1 のデータは、どれも編集距離は 0、F 値は 1 であり、RSSI の不安定でないビーコン環境において、提案手法を用いることでユーザの作業量を 0 にすることが可能であることが確認できた。この結果から、実環境において編集距離が大きくなってしまふ原因が、RSSI の不安定さであることが改めて確認できる。

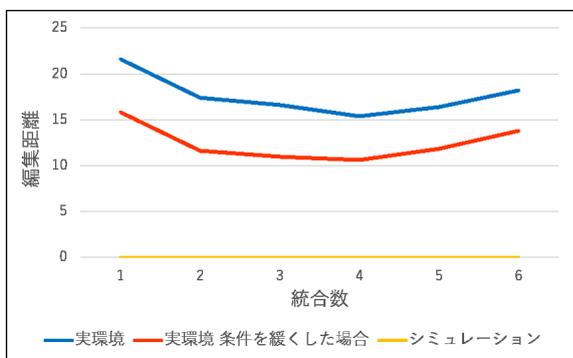


図 11 5214 教室，経路 1 で得られた編集距離の結果

次に、経路 2 における結果について、各評価尺度にて、経路 1 よりも低い精度をとる傾向にあった。編集距離については、経路 1 と同様、統合数 1 での値が最も悪くなっており、ビーコンデータ統合の必要性が確認できる。また、統合数 2 以降については、おおよそ 15~20 に分布しており、基準値の 20 は下回っているものの、ユーザの作業量が削減できたとは、あまり言えない結果である。シミュレーションシステムで得られる経路のデータは、統合数 1 が最も精度が高く、統合数 1 が最も精度の低い実環境とは異なった結果である。これは、RSSI の不安定さへの対策として、ビーコンデータの統合を行ったが、シミュレーション環境では、RSSI の不安定さがなく、データの統合がマイナスの効果を与えたためだと考えられる。経路 2 は経路 1 と比べ、歩行が少なく、データの統合によって、物理的に離れたノード間にリンクをつないでしまったからである。また、今回の実験環境におけるビーコンネットワークは、図 9 のように縦方向のリンクが長く、横方向のリンクが短くなっている。また、経路 2 で通らなかったリンクは短いリンクである。そのため、例えば経路 2 のスタート地点において、その左隣にあるビーコンとの間にリンクが結ばれる可能性は高い。しかし、リンクの長短が逆であった

場合、同じ経路 2 でデータを収集しようとする時、スタート地点で左隣のビーコンとの距離よりも、次にたどり着く、上のビーコンとの距離の方が短いため、左隣とのリンクが結ばれる可能性は、理想環境であれば、ほぼ 0 になってしまう。このような場合にも対応できるよう、リンクの接続手法を改善するか、もしくは良い結果が得られるような経路の提案をするシステムが必要であると考えられる。

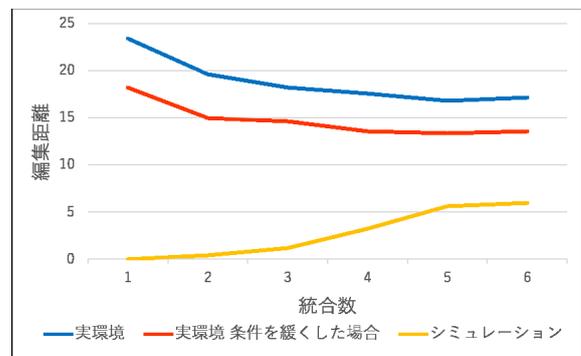


図 12 5214 教室，経路 2 で得られた編集距離の結果

最後に、経路 3 の実環境における結果について、編集距離は、教室によってはコスト 20 を下回ることがあっても、全体的に 20 前後に分布している、これは、今回リンクの接続に用いた手法の場合、RSSI の不安定さ以前に、正解経路ネットワーク上を歩くと、斜めのリンクが多く接続されてしまうからである。そのため、時系列情報を考慮してビーコンデータを統合したとしても、求めているようなデータ系列が得られない。また、シミュレーションシステムにおける結果についても、その編集距離は 5 を上回っており、経路 3 にて、提案したリンク接続手法は、あまり実用的ではない。そのため、経路 3 において、精度の高いビーコンネットワークを作成したい場合、手法を大きく変える必要があると考えられる。もしくは、スマートフォンのセンサ等からビーコンデータ以外のデータも収集し、複数のデータから総合的にリンクの接続関係を判断する等の改善が考えられる。

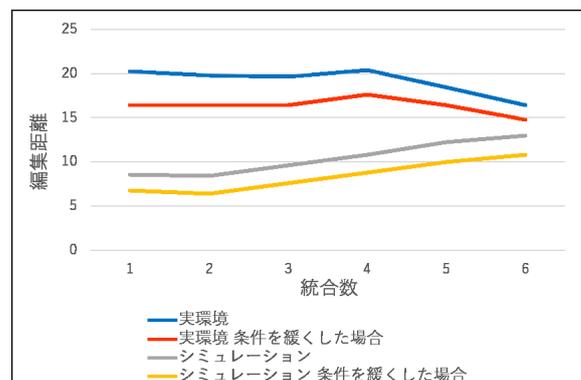


図 13 5214 教室，経路 3 で得られた編集距離の結果

以上の結果から、経路 1,2 のように正解ビーコンネットワーク上を通る場合には、時系列情報を利用し、ビーコンデータを統合する手法が、RSSI の不安定さを解消する上で有効であることが確認できた。また、その場合の編集距離の値は、提案手法を用いなかった場合に比べて小さくなるという結果が得られた。一方、経路 3 のように、正解ビーコンネットワーク上を通らない場合は、提案手法との相性が悪く、斜めのリンクをつなぐことが増えてしまうため、生成されるビーコンネットワークは低い精度となることが分かった。また、RSSI の不安定さに対するアプローチとして、時系列情報を用いたリンクの接続手法を提案したが、それでもユーザの作業量はおよそ 50%まで削減することしかできなかった。そのため、先に述べたように、スマートフォンのセンサ等から、加速度や方角といった、ビーコンから得られるデータ以外のデータも利用し、複合的にビーコンネットワークを生成する等の改善が考えられる。

7. おわりに

本論文では、BLE ビーコンを用いたグローバルマップマッチングによるユーザの移動経路・滞在推定において必要となる 2 つのネットワークのうちビーコンネットワークについて、そのトポロジー作成を自動化するシステムを提案した。ビーコンデータの補正、ビーコンネットワークの推定機能の大きく分けて 2 つの機能を実装することで、ビーコンのノード情報とリンク情報からなる、ビーコンネットワーク情報を出力するシステムを実装した。そして、生成されたビーコンネットワークが、どの程度手作業で作成したビーコンネットワークに近いかを検証する評価実験を行った。評価実験では、3 つの教室、3 種類の歩行経路について、編集距離、適合率、再現率、F 値を計算、比較することで評価した。実験の結果、手作業で作成したビーコンネットワークのすべてのリンク上を歩行する経路、手作業で作成したビーコンネットワークの一部のリンク上を歩行する経路、どちらの経路においても、ビーコンデータを統合していれば、提案手法を用いなかった場合よりも、編集距離の値は小さくなった。また、正解ビーコンネットワークの条件を緩くした場合の精度は、およそ 50%であり、ユーザの作業量を最大で 1/2 近くまで減らすことができることが確認できた。さらに、シミュレーションシステムにおける精度はおよそ 100%であり、RSSI の不安定さが、実環境における精度の低下に影響を与えていることも改めて確認できた。今後の課題として、まず、推定したネットワークの精度の向上があげられる。手作業で作成したビーコンネットワークのすべてのリンク上を通らずとも、精度の高いビーコンネットワークが生成できる必要がある。また、部屋の形や手作業で作成したビーコンネットワークが四角形以外の形をしていた場合、生成するビーコンネット

ワークの精度が落ちることが予測されるため、その対応が必要である。さらに、今回出力されるビーコンネットワーク情報のうち、ノード情報にはビーコン ID の情報しか格納されておらず、実際に経路・滞在推定をするためには、ビーコンの位置情報も必要である。スマートフォンによるビーコンデータ収集のタイミングで、スマートフォンのセンサ情報等から位置情報も導出することができれば、ユーザの作業量はさらに少なくなり、手軽に経路・滞在推定することが可能になる。

参考文献

- [1] 山本 大介, 田中 亮佑, 梶岡 慎輔, 松尾 啓志, 高橋 直久, BLE ビーコンを用いたグローバル マップマッチングによる経路推定法, DICOMO2018 講演論文集, pp.1027 - 1034, 2018.
- [2] Daisuke Yamamoto, Ryosuke Tanaka, Shinsuke Kajioka, Hiroshi Matsuo, Naohisa Takahashi, Global Map Matching using BLE Beacons for Indoor Route and Stay Estimation, Proc. of the 26th ACM SIGSPATIAL 2018, pp. 309-318, Seattle, Nov. 2018.
- [3] 齋藤 孝徳, BLE ビーコンによる屋内外経路推定のためのネットワーク編集システムの開発, 名古屋工業大学情報工学科卒業論文
- [4] 齋藤 孝徳, BLE ビーコンと GPS を用いた屋内外における人の移動経路推定システム, 名古屋工業大学情報工学科修士論文
- [5] 山下 睦, 西山 勇毅, 小松 寛弥, 川原 圭博, BLE ビーコンを用いた屋内位置推定システムの設計と実装, 情報処理学会研究報告, Vol.2020-HCI-190 No.8, Vol.2020-UBI-68 No.8
- [6] Tomoya Arakawa, Shun Shiramatsu, Akira Iwata, Wandering Path Visualization System Prototype for Finding Wandering Elderly People Using BLE Beacon, 2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW), pp.491495 (2018).
- [7] Shinsuke Kajioka, Daisuke Yamamoto, Takahiro Uchiya, Shoichi Saito, Hiroshi Matsuo, and Ichi Takumi. 2016. Operation of Localization-based Attendance Check System using BLE Beacons, In Proceedings of the Information Processing Society of Japan Technical Reports, 2016-SPT-20, No. 12, 17.
- [8] 酒井 瑞樹, 森田 裕之, Bluetooth を用いた屋内位置推定手法の提案, 経営情報学会 全国研究発表大会要旨集, pp.53-56, 2016.
- [9] LINE みんなの使い方ガイド - LINE Beacon を設定する <https://guide.line.me/ja/account-and-settings/settings/line-beacon.html>
- [10] 授業打刻アプリ (Nitech ビロリン) 提供サービス - 国立大学法人名古屋工業大学 情報基盤センター <http://www.cc.nitech.ac.jp/service/common/pyrroline.html>
- [11] 梶岡 慎輔, 山本 大介, 打矢 隆弘, 齋藤 彰一, 松尾 啓志, 内匠 逸, BLE ビーコンを用いた位置推定による打刻システムの運用と課題, 研究報告セキュリティ心理学とトラスト (SPT), 2016-SPT-20, No.12, pp.1-7, 2016.
- [12] 木村 峻介, 松本 卓人, 浜中 雅俊, 李 昇姫, 迷子探しを目的とした屋内位置情報サービスの構築, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol12, No.4, pp.177-183. 2013.
- [13] ビーコンで顧客追跡 パルコ、改装効果を動線分析で検証:日本経済新聞 <https://www.nikkei.com/article/>

DGXMZ086981600Z10C15A5000000/

- [14] 物品位置管理 IoT サービス Xeye クロスアイ ビーコンとは？ビーコンの活用方法をご紹介
<https://www.xeye.jp/technology/beacon-utilization.html>
- [15] 岡田一晃, 飯田啓量, Chenyi Liao, 今井瞳, 浦野健太, 牧与史, 角倉慎弥, 三橋諒也, 野惇登, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫, BLE を用いた IPSJ79 スタンプラリーの開発と行動分析, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2017) シンポジウム, pp. 1178-1187, 2017.
- [16] 駒井 清顕, 藤本 まなと, 荒川 豊, 諏訪 博彦, 安本 慶一, 複数人の行動・移動状況の把握を目標とした iBeacon による存在領域判定システムの検討, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ 2015 論文集, Vol.2015, No.5, pp.71-77, 2015.