

# BLEビーコンとGPSを用いた シームレスな屋内外移動経路推定手法

梶岡 慎輔<sup>1</sup> 齋藤 孝徳<sup>1</sup> 山本 大介<sup>1</sup> 高橋 直久<sup>1</sup>

**概要:** マップマッチングを用いて移動・滞在経路を推定する手法が広く利用されている。我々の研究グループでは、屋内の移動・滞在経路を推定するため、スマートフォンなどの利用者端末で受信した BLE ビーコンの RSSI をもとに端末位置の候補点を決定し、候補点の時系列データからグローバルマップマッチングにより端末の移動・滞在経路を推定する手法を提案した。しかしこの手法は1つのフロア内に経路が収まることを想定しており、フロア間移動や屋外への移動は考慮されていない。また本学のビーコン発信機は屋外で移動経路を推定することを想定して設置されていない。そのため屋外ではビーコン発信機の設置密度が低くマップマッチングに不適であったり、BLE ビーコンが受信できず移動経路の推定が困難になる場所が存在したりする。そこで本研究ではマップマッチングに用いるデータを拡張してフロア間移動や屋内外の移動が含まれる場合でもシームレスに移動経路が推定できるようにする。このような推定を実現するために、マップマッチングに用いるマップ同士を接続する目的のノードを新たに定義し、そのノードを経由することでフロア間や屋内外のマップの切り替えを実現する。また屋外で BLE ビーコン以外に GPS を用いた測位が利用可能な場合は GPS をマップマッチングに利用し、屋外を移動した際にも推定移動経路が途切れにくい手法を提案する。評価実験を実施した結果、提案手法によりフロア間、屋内外でシームレスに移動経路が推定できることを確認し、BLE ビーコンと GPS を併用することでより高い経路適合率、経路再現率が得られることが示された。

## Continuous Trajectory Estimation between Indoors and Outdoors using BLE Beacons and GPS

SHINSUKE KAJIOKA<sup>1</sup> TAKANORI SAITO<sup>1</sup> DAISUKE YAMAMOTO<sup>1</sup> NAOHISA TAKAHASHI<sup>1</sup>

### 1. はじめに

本学では約 1600 個の Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコン発信機を教室内外に設置し、授業の出席確認などに活用している。BLE ビーコン発信機は教室内に最低 2 個設置されており、760 ms おきに送出されている BLE ビーコンを数秒間受信してその発信機 ID と受信電界強度 (RSSI) から学生がスマートフォンで打刻操作をした場所を推定している。我々の研究グループでは、スマートフォンなどの利用者端末の位置をその場で推定するだけでなく、利用者の移動・滞在経路を推定する研究を行っている。これまでに、利用者の端末で受信した BLE ビーコンの RSSI をもと

に端末位置の候補点を決定し、候補点の時系列データからグローバルマップマッチングにより端末の移動・滞在経路を推定する手法を提案した [1], [2]。この手法は、あらかじめ BLE ビーコン発信機の設置位置をモデル化したビーコンネットワークと人の移動経路をモデル化した経路ネットワークをフロアごとに作成しておき、BLE ビーコン向けに改良した ST-Matching[3] を行うという手法である。BST マッチングでは1つのフロア内に経路が収まることを想定しており、フロア内、つまり単一ネットワーク内の経路推定は問題なく機能する。しかし、フロアをまたいだり屋内外を移動したりする場合はそれぞれのネットワークが異なるためにネットワークをまたぐ部分で経路推定を打ち切る必要があった。本研究は、フロア間移動や屋外への移動を含む場合もシームレスに経路が推定できるようになること

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

を目指し、ネットワークにおける接続ノードの定義を拡張して隣接するネットワークを結合してフロア間や屋内外をまたぐ経路推定を実現するものである。また本学のビーコン発信機は屋外で移動経路を推定することを想定して設置されていない。そのため屋外ではビーコン発信機の設置密度が低く、マップマッチングに不適であったり、BLE ビーコンが受信できず移動経路の推定が困難になる場所が存在したりする。そこで本研究では屋外で GPS を用いた測位が利用可能な場合は GPS 測位データをマップマッチングに利用し、屋外を移動した際にも推定移動経路が途切れにくい手法を提案する。

## 2. 関連する経路推定手法

スマートフォンを用いて屋内外でシームレスに位置推定やナビゲーションが行えるシステムが提案されている [4]。このシステムでは、GPS、BLE ビーコン、NFC タグを用いて屋内外のシームレスな位置推定を実現している。GPS は主に屋外における広範囲な位置推定に、NFC タグはスポット的な位置推定に用いる。文献 [4] のシステムでは、BLE ビーコンを受信したりユーザが端末を NFC タグに近づけたりすると自動で屋内モードに切り替わり、BLE ビーコンを受信しなくなると自動で屋外モードに切り替わる。このシステムでは屋内外でマップが独立しており、システムが屋内か屋外かを判定してマップを切り替える。ユーザのスマートフォンは、GPS 測位データまたはサーバへ送信して返された BLE ビーコン位置もしくは NFC タグ設置位置を元にマップにおけるスマートフォンの位置を同定する。

GPS で取得した移動軌跡は、緯度、経度、タイムスタンプの情報を持つ点の系列として構成されている。このデータは、緯度、経度に関しては GPS の測定誤差が、系列としてはサンプリング誤差や欠落が含まれる。そのため、GPS で測位した座標は多くの場合において地図上にあらかじめ作成された道路ネットワーク<sup>\*1</sup>、つまり存在しうる座標の上に補正される [5]。この補正の手続きはマップマッチングと呼ばれており、一般に交通流解析やナビゲーションシステムなどの多くのアプリケーションで広く行われている。

マップマッチングのアルゴリズムには、1つの入力データを処理するローカルマップマッチング、連続する入力データをリアルタイムに逐次処理できるインクリメンタルマップマッチング、およびすべてのデータを入力して処理するグローバルマップマッチングなどがある [6]。このうちローカルマップマッチングとインクリメンタルマップマッチングはリアルタイムに処理できるが、グローバルマップマッチングはすべての時系列データを入力する必要があるためリアルタイムに処理できない。移動軌跡から経路を推定する際によく用いられるアルゴリズムはインクリメン

<sup>\*1</sup> 道路の特徴点である交差点や曲がり角をノード、それらをつなぐ道路にあたる部分をリンクとしたネットワークのこと。

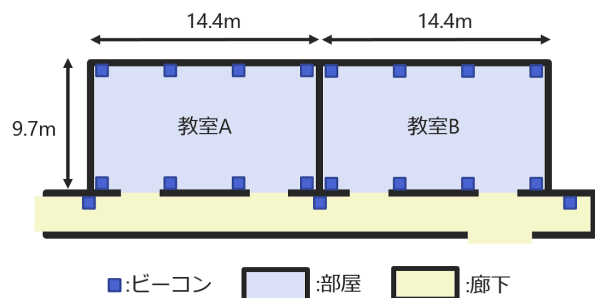


図 1 BLE ビーコン発信機の設置例 (屋内平面図)

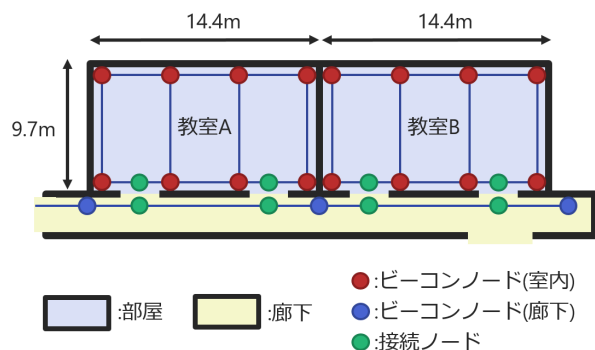


図 2 ビーコンネットワークの例 (屋内平面図)

BLE ビーコン発信機の設置位置付近にビーコンノードを置き、分離したい場所の接続点に接続ノードを置く。隣接するノードをリンクで接続する。

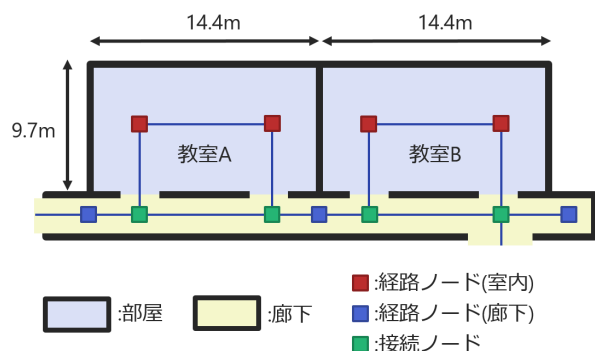


図 3 経路ネットワークの例 (屋内平面図)

人の移動経路をモデル化したものである。図2のビーコンネットワークより粗い粒度で経路推定に必要なノードを置く。隣接するノードをリンクで接続する。

タルマップマッチング [4], [7], [8], [9] とグローバルマップマッチング [10], [11] である。双方とも、トポロジ情報、移動距離、遷移確率などの付加情報の付くリンクを持つことで、ローカルマップマッチングより高効率なマップマッチングが可能である。本研究では経路推定に際し計算時間は不問でリアルタイム性を求めないことから、より高い精度を出せるグローバルマップマッチングを用いて検証する。

## 2.1 BST マッチング

我々の研究グループで提案した BST マッチング [1], [2] は, GPS を用いた経路推定で利用されるグローバルマップマッチングの手法の 1 つである ST-Matching[3] を BLE ビーコン向けに改良したものである。

ST-Matching は, Spatial 分析と Temporal 分析によってサンプリングレートが 2 分以上の低サンプリングレート下においても従来手法より高精度なマップマッチングを実現した手法である。各時刻における推定位置候補点は, GPS 測位座標から定数半径  $r$  以内のリンク上の最も近いノードとしている。各候補点および候補点間のスコアリングは, 空間的なスコアと時間的なスコアに基づいて行われる。これらのスコアをもとにビタビアルゴリズムを用いてスコアが最大となる経路を導出する。

BST マッチングは, BLE ビーコンの RSSI からある時刻におけるユーザの位置の候補点を決定し, それらの系列からユーザの移動経路を推定する。BST マッチングを提案した際に想定していた環境は, 図 1 に示すように BLE ビーコン発信機が多数設置されている屋内である。屋内は部屋同士や部屋と廊下が隣接している場合が多いため, 屋外より精度な推定位置の分離が求められる。そこで BST マッチングでは BLE ビーコン発信機を部屋あるいは廊下ごとに区別し, まず近接ビーコン発信機を結ぶビーコンネットワーク (図 2) の系列で経路推定を行い, その結果を用いて粒度を下げた経路ネットワーク (図 3) の系列で経路推定を行う方法により, 精度な推定位置の分離を実現した。本研究ではこのように BLE ビーコン発信機や人の移動経路の関係をモデル化したトポロジをネットワークと呼ぶ。各ネットワークにおいて, 区別する場所を接続するために設けられた仮想ノードを**接続ノード**と呼ぶ。

## 3. シームレスな屋内外移動経路推定手法

シームレスな屋内外移動経路推定を実現するため, [1], [2] では考慮していなかったフロア間および屋内外の移動, および屋外での測位を考える。文献 [4] ではシステムが屋内外を判定してマップ, つまりネットワークを切り替えることで屋内外でシームレスなナビゲーションを実現していたが, 我々はシステムの屋内外判定に頼らずシームレスな移動経路推定を実現しようと考えた。そこで本研究では隣接フロアや屋内外のネットワークを接続ノードで結合し, システム上は単一と扱える結合されたネットワーク上で移動経路の推定を行うことにする。フロア間および屋内外の移動を推定できるようにするため, 上下フロアのネットワークを接続する**階段ノード**と, 屋内外のネットワークを接続する**出入口ノード**を接続ノードとして新たに定義する。

また, 屋外の BLE ビーコンが受信しにくい, あるいは受信できない場所での位置推定を可能にするため, GPS による測位を行う。

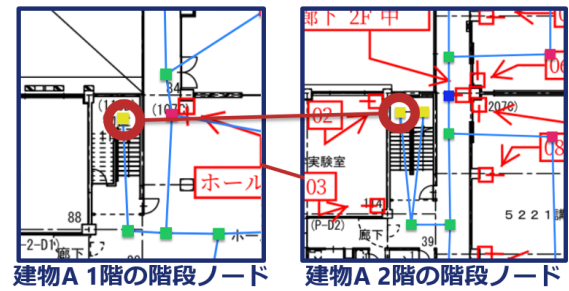


図 4 階段ノード (赤丸内の黄点) の設置例

左図 1 階の階段ノードと右図 2 階の階段ノードは移動コスト 0 で移動できると定義する。階段ノードの設置によりフロアをまたぐネットワーク間の相互接続が実現する。

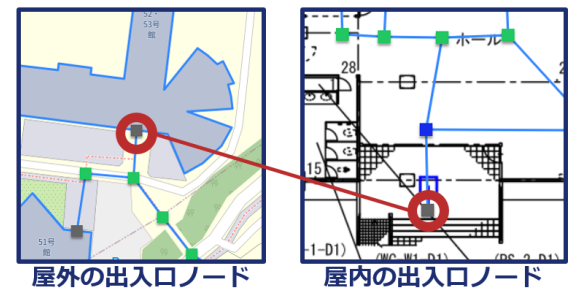


図 5 出入口ノード (赤丸内の灰点) の設置例

左図 屋外の出入口ノードと右図屋内の出入口ノードは移動コスト 0 で移動できると定義する。出入口ノードの設置により屋内外ネットワーク間の相互接続が実現する。(地図: [12])

### 3.1 階段ノード

階段ノードは接続ノードの一種で, 上下フロアのネットワークを接続するためのノードである。おおむね屋内平面図における階段の踊り場に設置するものとする。階段ノードの設置例を図 4 に示す。移動経路推定時, ある階段ノードから隣接するフロアの対応する階段ノードに移動コスト (ノード間距離) 0 で移動できると定義する。階段ノードは通常廊下上の隣接ノードとリンクで接続されている。

### 3.2 出入口ノード

出入口ノードも接続ノードの一種で, 屋内と屋外のネットワークを接続するためのノードである。屋内平面図における建物の屋内外出入口に設置するものとする。出入口ノードの設置例を図 5 に示す。移動経路推定時, ある出入口ノードから対応する出入口ノードに移動コスト 0 で移動できると定義する。出入口ノードは通常廊下あるいは屋外道路上の隣接ノードとリンクで接続されている。

### 3.3 スコアリング

BST マッチングでは, 入力された候補点の時系列データについて, 各候補点とそれぞれの候補点間のスコアリングを行う。最終的に, 最も新しい時刻の各候補点を持つスコ

アが最大となる候補点を選出し、その候補点から時間をさかのぼり通過した候補点を推定経路とする。

### 3.3.1 候補点のスコアリング

候補点のスコア  $N(c_i^j)$  のスコアリングは、観測地点と候補点  $c_i^j$  の距離を表したもので、距離が近いほどスコアは高くなる。BLE ビーコン発信機と観測者の距離  $d_B$  はフリスの伝達公式によって観測者が受信した BLE ビーコンの RSSI  $RSSI_{cur}$  から簡易算出でき、

$$d_B = 10^{\frac{1}{20}(RSSI_{max} - RSSI_{cur})} \quad (1)$$

で表される。  $RSSI_{max}$  は BLE ビーコン発信機から 1m 離れた位置における RSSI である。この値は BLE ビーコンの特性や発信機設置場所や周囲の環境により異なるが、本研究では実測値をもとに室内の BLE ビーコンは  $-55$  dBm、廊下の BLE ビーコンは  $-60$  dBm とした。ビーコンデータによる候補点  $c_i^j$  のスコア  $N(c_i^j)$  は距離  $d_B$  の逆数を取り

$$N(c_i^j) = \frac{1}{d_B} \quad (2)$$

とする。RSSI が大きいほどスコアが 1 に近づく。

本研究では GPS 測位データも BLE ビーコンデータと並べて候補点をスコアリングする必要がある。式 2 でビーコンデータによる候補点のスコアを距離の逆数と定義した。そこで、GPS 測位データによる候補点  $c_i^k$  のスコア  $N(c_i^k)$  は GPS 測位した位置と候補点  $c_i^k$  の距離  $d_G$  の逆数を取り

$$N(c_i^k) = \frac{1}{d_G} \quad (3)$$

とする。

### 3.3.2 候補点間のスコアリング

候補点間のスコア  $F_t(c_{i-1}^s \rightarrow c_i^s)$  は、推定した経路における時刻  $t_{i-1}$  から  $t_i$  の移動速度  $v$  が平均歩行速度  $v_a$  からどれだけ乖離しているかをスコアリングしたものである。以下の式に示す通り、平均歩行速度以内であれば 1、平均歩行速度より早ければ早いほど 0 に近づく。

$$F_t(c_{i-1}^s \rightarrow c_i^s) = \begin{cases} 1 & (v \leq v_a) \\ \frac{v_a \Delta t}{dist} & (v > v_a) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $dist$  はネットワーク上の 2 点間の距離、 $\Delta t$  は経過時間である。本研究では平均歩行速度  $v_a$  を  $2.0$  m/s とした。この式により、歩行速度として不自然な移動を検出する。

### 3.4 移動経路推定

時系列データの候補点スコアと候補点間スコアを計算すると、時系列データの最終時刻  $t = n$  における各候補点のスコアが算出される。ここで算出されたスコアが最大となる候補点を選出し、その候補点から時間をさかのぼり通過した候補点が推定経路となる (図 6)。

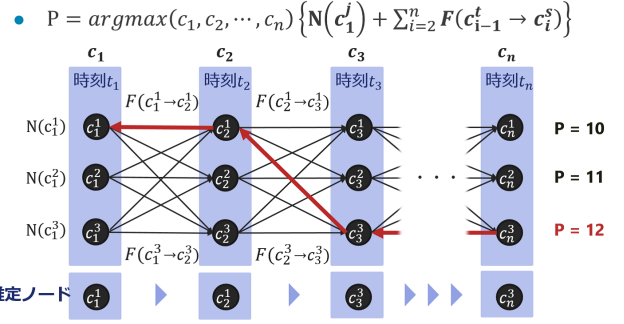


図 6 時系列データの候補点・候補点間スコアリングと推定経路  
最終時刻  $n$  においてスコアが最大となる候補点  $c_n^s$  を選出し、そこから赤矢印のように時間をさかのぼり通過した候補点が推定経路となる。

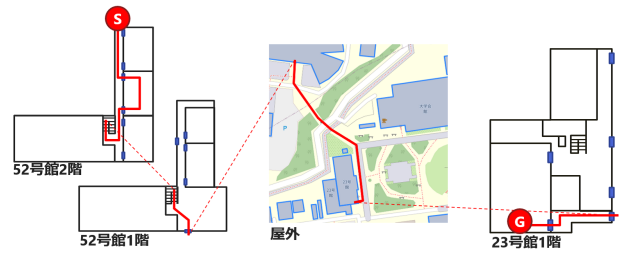


図 7 ルート 1

S: スタート地点 (52 号館 2 階廊下) から G: ゴール地点 (23 号館 1 階教室) へ、廊下や教室を経由して階段や道路を通過してフロア間・屋内外を移動した実際の経路。左右の図は屋内フロア平面図、中央の図は 52 号館と 23 号館の位置関係を示す地図。(地図: [12])

## 4. 評価実験

BLE ビーコンと GPS を用いたシームレスな屋内外移動経路推定が実現できることを確認するため、評価実験を行った。本研究ではあらかじめ取得したデータを用いたグローバルマップマッチングを行うため、まず移動経路を定め、その経路を歩行して BLE ビーコンと GPS のデータを取得する。次に取得したデータを典型的な手法に従い解析し、屋内外移動経路推定の実現可能性と性能を評価する。

### 4.1 移動経路の決定

シームレスな屋内外移動経路推定が実現できることを確認するため、屋内のフロア間、および屋内から屋外へ、また屋外から屋内へ途切れなく移動する経路を定める。今回は図 7 に示すルート 1 のスタート地点 S からゴール地点 G を移動経路とした。ルート 1 は、本学 52 号館 2 階の廊下をスタートし、途中で教室に入り、教室を出た後に廊下を通過して階段を降り、1 階の廊下を通過して 52 号館の出入口から屋外へ出て、大学構内および車道を通り、23 号館の廊下から 1 階の教室へ入る経路である。

## 4.2 ビーコンネットワークと経路ネットワークの作成

屋内におけるビーコンネットワーク、経路ネットワークと同様に、4.1 節で定めたルート 1 をなぞるように屋外でもビーコンネットワークと経路ネットワークを作成した。屋外のビーコンネットワークは、BLE ビーコン発信機の設置点と、建物の出入口や曲がり角といった経路推定を行う上で重要な点にノードを配置し、隣接ノード間をリンクで結んだ。同様にして屋外の経路ネットワークを作成した。

## 4.3 データの収集

データを収集する際は、データ収集用の端末を手に持ち、4.1 節で定めたルート 1 を歩行して BLE ビーコンおよび GPS データを収集した。データ収集用の端末には我々が開発したデータ収集用アプリケーションがインストールされており、データ収集中は常に動作している状態にした。アプリケーションの設定で、1 回あたりの電波スキャン時間、および BLE ビーコンの観測時間をともに 1 秒に設定し、1 秒ごとに区切られた移動軌跡データを収集した。収集したビーコンデータの例を以下に示す。

---

```
16:36:17.36 // 時刻 t
1127,-81 // 受信ビーコン 1 major,RSSI
1149,-84 // 受信ビーコン 2 major,RSSI
1151,-84 // 受信ビーコン 3 major,RSSI
1138,-84
1150,-88
1152,-88
1142,-88
1126,-90
1134,-90
1137,-94
1144,-96
```

---

```
16:36:18.36 // 時刻 t+1
1145,-70 // 受信ビーコン 1 major,RSSI
1142,-81 // 受信ビーコン 2 major,RSSI
1098,-86 // 受信ビーコン 3 major,RSSI
1148,-87
1141,-87
1126,-90
1144,-90
1140,-91
1150,-91
1125,-95
```

アプリケーションで収集できるデータは、時刻  $t$  に観測した BLE ビーコンの major 値（発信機 ID）と受信電界強度（RSSI）の組であるビーコンデータの集合、および時刻  $t$  における GPS 測位結果とその推定確度（Accuracy<sup>\*2</sup>）である。BLE は低消費電力であり、2.4 GHz 帯を使用するた

<sup>\*2</sup> 実験に用いた端末で取得できる Accuracy は 68%信頼区間の円の半径である [13]。例えば Accuracy が 10 の場合、68%の確率で推定点から半径 10 m の円内にユーザが存在する。

め、人の存在や動きが RSSI に大きく影響する。実験ではこの影響を極力小さくするため、屋内の廊下や教室内、また屋外にも実験者 1 名を除き人がいない状態でデータを収集した。データの収集は同じ経路で 6 回行った。

## 4.4 データの統合

RSSI は時間的な変化が大きく、ほぼ同じ場所で 760 ms 後に受信した電波の RSSI が 10 dB 異なることは特異なことではない。一方で、理論的には BLE ビーコンの RSSI が 10 dB 異なる場合は発信機からの距離が 10 m 以上異なる時みなされても不自然ではない。たとえば 4.3 節に示したビーコンデータでは、時刻  $t$  における major=1142 の RSSI は -88 dBm であるが、時刻  $t+1$  における RSSI は -81 dBm である。このように揺らぎの大きい RSSI の性質を認知した上で経路推定を行うため、BST マッチングではマッチング処理にかける前にビーコンデータを統合し、さらに基準値  $RSSI_{\min}$  に満たない RSSI のビーコンデータを除外している。統合されたビーコンデータの時刻は統合前データの最新のものになり、major 値が重複した場合は RSSI が最大のデータのみを残す。先に示した major=1142 を例に挙げると、統合したビーコンデータの RSSI は -81 dBm となる。統合したビーコンデータの例を以下に示す。

---

```
16:36:18.36 // 時刻 t+1
1145,-70 // 受信ビーコン 1 major,RSSI
1127,-81 // 受信ビーコン 2 major,RSSI
1142,-81 // 受信ビーコン 3 major,RSSI
1149,-84
1151,-84
1138,-84
```

GPS データもビーコンデータと同様に統合する。GPS データは GPS 測位結果とその Accuracy の組で構成される。統合された GPS データの時刻は統合前データの最新のものになり、Accuracy が最高のデータのみを残す。

なお、今回の実験では統合するデータ数を 3 とした。基準値に満たずビーコンデータから除外する RSSI の閾値は文献 [1] を参考に、室内ビーコンは  $RSSI_{\min} = -75$  dBm、廊下ビーコンは  $RSSI_{\min} = -79$  dBm とした。また経験的に統合した GPS データの Accuracy が 15 より低い場合はその GPS データを破棄する。

## 4.5 移動経路推定結果とその評価

4.3 節および 4.4 節で述べたようにビーコンデータを収集および統合したデータを用いて BST マッチングにより移動経路を推定した。

移動経路推定結果を確認したところ、シームレスな屋内外移動経路推定が実現できたことを確認できた。具体的には、本研究で経路ネットワーク上に新たに定義した、フロ

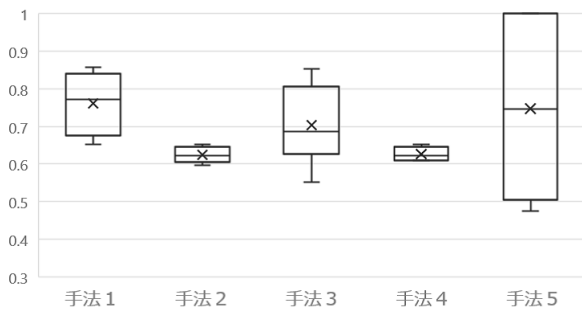


図 8 ルート 1 の経路推定結果の適合率  
BLE ビーコンと GPS を複合的に利用する手法 1 の平均 0.76 が最良となった。

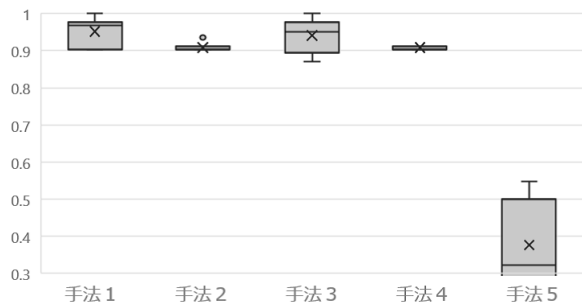


図 9 ルート 1 の経路推定結果の再現率  
BLE ビーコンと GPS を複合的に利用する手法 1 の平均 0.95 が最良となった。

ア間移動を推定するための階段ノードを経由して 2 階から 1 階へ移動したこと、屋内外の移動を推定するための出入口ノードを経由して屋内から屋外、屋外から屋内へ移動したことが推定結果として得られた。

ここでは典型的な経路推定手法に従い取得したデータをさらに解析し、屋内外移動経路推定の性能を手法別に簡易評価する。以下に簡易評価に用いる手法 5 つを挙げる。

- 手法 1 提案手法 a: BLE ビーコンの候補点と GPS の候補点を併用
- 手法 2 提案手法 b: BLE ビーコンの候補点がない場合 GPS の候補点を使用
- 手法 3 提案手法 c: GPS の候補点がない場合 BLE ビーコンの候補点を使用
- 手法 4 比較手法 d: BLE ビーコンの候補点のみ使用
- 手法 5 比較手法 e: GPS の候補点のみ使用

手法 1 では BLE ビーコンの候補点と GPS の候補点を併用するが、3.3 節で述べたスコアリングを行う際に BLE ビーコンの候補点と GPS の候補点を対等に扱う。

各手法の性能を簡易評価するため、同じ経路で 6 回収集したデータの適合率と再現率を求めた。適合率を図 8 に、

再現率を図 9 に示す。適合率は、推定した経路と実際に通過した経路の共通部分が推定した経路にどれだけ含まれるかを示すものである。推定した経路が正確であるほど適合率は 1 に近づく。再現率は、推定した経路と実際に通過した経路の共通部分が実際に通過した経路にどれだけ含まれるかを示すものである。推定した経路が実際の経路を網羅しているほど再現率は 1 に近づく。集合  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  を

$V_1$ : 推定した経路の経路ネットワーク上のリンクの集合

$V_2$ : 実際に通過した経路ネットワーク上のリンクの集合

$V_3: V_1 \cap V_2$

と定義し、集合  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  の要素数を  $n(V_1)$ ,  $n(V_2)$ ,  $n(V_3)$  とすると、適合率と再現率は

$$\text{適合率 } p = n(V_3)/n(V_1)$$

$$\text{再現率 } r = n(V_3)/n(V_2)$$

となる。

図 8, 図 9 は箱ひげ図であり、ひげの下端が最小値、箱の下端が第一四分位数、箱の中線が中央値、箱の上端が第三四分位数、ひげの上端が最大値である。また図中に示すクロス印は平均値である。

図 8 より適合率を見ると、BLE ビーコンの候補点と GPS の候補点を併用した手法 1 提案手法が平均的に最良の結果となった。GPS の候補点のみを使用する手法 5 の適合率の第三四分位数より上は 5 つの手法の中で最良となったが、一方で図 9 を見ると、手法 5 の再現率は他の手法と比較して明らかに低い。一般に、適合率と再現率はトレードオフの関係にあると言われている。GPS の候補点のみを使用する手法 5 では、特に屋外で正確に推定された際に適合率が高くなる場合があるが、他の 4 手法では BLE ビーコンの候補点を使用する屋内では手法 5 で推定した経路が実際の経路を網羅できておらず再現率が低くなったと考えられる。

手法 2 は BLE ビーコンの候補点を使用し、BLE ビーコンの候補点がない場合のみ GPS の候補点を使用する手法である。手法 1 と手法 2 を比較すると、手法 2 は適合率と再現率ともに低く、6 回の試行間で値の差が小さいことがわかる。また、手法 2 と手法 4 は適合率と再現率ともに似た結果が得られた。手法 4 は BLE ビーコンの候補点のみを使用する手法である。これらの結果より、いかなる場合も BLE ビーコンの候補点を使用するよりも適宜 GPS の候補点を使用した方が良い結果が得られそうであることが推測できる。また、今回収集したデータは BLE ビーコンの候補点がない場合が少ないために手法 2 と手法 4 の結果が似ている可能性がある。

手法 3 は GPS の候補点を使用し、GPS の候補点がない場合に BLE ビーコンの候補点を使用する手法である。手法 1 と手法 3 を比較すると、適合率と再現率ともに似た傾向の結果であるが、適合率の最小値は手法 1 が 0.65 であるが手法 3 は 0.55、再現率の最小値は手法 1 が 0.90 であるが手法 3 は 0.87 であり、ともに手法 3 が低い。この結

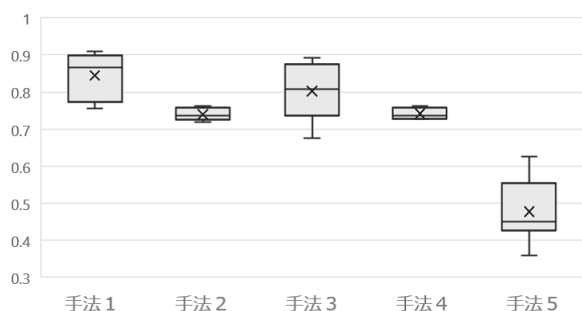


図 10 ルート 1 の経路推定結果の F 値  
BLE ビーコンと GPS を複合的に利用する手法 1 の平均 0.84 が最良となった。

果より、GPS の候補点が存在する場合でも十分信頼できる BLE ビーコンの候補点が得られる場合はそれを利用した方が良い結果が得られそうであることが推測できる。

参考に、適合率と再現率の調和平均を取った F 値を図 10 に示す。F 値は次式で定義されるシステムの性能を示す指標である。

$$F \text{ 値 } F = 2pr / (p + r)$$

F 値では手法 5 が他の手法と比較して明らかに良くない結果となり、手法 1 が最良となった。

なおルート 1 の他にもいくつかの経路を定めて評価実験を行ったが、どの経路においてもシームレスな屋内外移動経路推定が実現できたことを確認した。

## 5. おわりに

本研究は、フロア間移動や屋外への移動を含む場合もシームレスに経路が推定できるようになることを目指し、マップマッチングに用いるデータを拡張した。ビーコンネットワークおよび経路ネットワークにおける接続ノードに新たに階段ノードと出入口ノードを追加し、隣接するネットワークを結合してフロア間や屋内外をまたぐ経路推定を実現した。また屋外で BLE ビーコン以外に GPS を用いた測位が利用可能な場合は GPS 測位データをマップマッチングに利用し、屋外を移動した際にも推定移動経路が途切れにくくした。

評価実験を実施した結果、提案手法によりフロア間、屋内外でシームレスに移動経路が推定できることを確認し、BLE ビーコンと GPS を併用することでより高い経路適合率、経路再現率が得られることが示された。今回の評価では統計値あるいはグローバルマップマッチングの実行結果として、推定した経路の適合率と再現率をそれぞれ 1 つ示した。しかし、推定した経路は時系列データであり、場所や状況により推定の良し悪しが時間的に変化する。経路推定結果と実際に通過した経路を照合し、どのような状況でどのような手法が有利なのかを検証したい。また、移動時間が長くなったりネットワークが分岐して複雑になったり

すると組合せ爆発を起こすので、候補点の効果的な削減や収集したデータのクレンジングを検討したい。

謝辞 本研究は科研費 19H04115 の助成を受けたものである。

## 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] Yamamoto, D., Tanaka, R., Kajioka, S., Matsuo, H. and Takahashi, N.: Global Map Matching using BLE Beacons for Indoor Route and Stay Estimation, *Proceedings of ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, SIGSPATIAL 2018, ACM, pp. 309–318 (2018).
- [3] Lou, Y., Zhang, C., Zheng, Y., Xie, X., Wang, W. and Huang, Y.: Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories, *Proceedings of ACM SIGSPATIAL International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, ACM-GIS 2009, ACM, pp. 352–361 (2009).
- [4] Cheng, R.-S., Hong, W.-J., Wang, J.-S. and Lin, K. W.: Seamless Guidance System Combining GPS, BLE Beacon, and NFC Technologies, *Mobile Information Systems*, Vol. 2016, Article ID 5032365, 12 pages (2016).
- [5] White, C. E., Bernstein, D. and Kornhauser, A. L.: Some map matching algorithms for personal navigation assistants, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 8, No. 1, pp. 91–108 (2000).
- [6] Gong, Y.-J., Chen, E., Zhang, X., Ni, L. and Zhang, J.: AntMapper: An Ant Colony-Based Map Matching Approach for Trajectory-Based Applications, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. PP(99), pp. 1–12 (2017).
- [7] Velaga, N. R., Quddus, M. A. and Bristow, A. L.: Developing an enhanced weight-based topological map-matching algorithm for intelligent transport systems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 17, No. 6, pp. 672–683 (2009).
- [8] Wei, H., Wang, Y., Forman, G., Zhu, Y. and Guan, H.: Fast Viterbi Map Matching with Tunable Weight Functions, *Proceedings of Advances in Geographic Information Systems*, SIGSPATIAL 2012, ACM, pp. 613–616 (2012).
- [9] Abdallah, F., Nassreddine, G. and Denoeux, T.: A Multiple-Hypothesis Map-Matching Method Suitable for Weighted and Box-Shaped State Estimation for Localization, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 1495–1510 (2011).
- [10] Joshi, R.: A new approach to map matching for in-vehicle navigation systems: the rotational variation metric, *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems*, ITSC 2001, IEEE, pp. 33–38 (2001).
- [11] Knapen, L., Bellemans, T., Janssens, D. and Wets, G.: Likelihood-based offline map matching of GPS recordings using global trace information, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 93, pp. 13–35 (2018).
- [12] openstreetmap.org: OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>.
- [13] Google Developers: Android API Reference - Location, [https://developer.android.com/reference/android/location/Location#getAccuracy\(\)](https://developer.android.com/reference/android/location/Location#getAccuracy()).