

医療・介護における疎なBLEスキャナ配置を前提とした移動経路の推定手法

中村 翼^{1,a)} 吉廣 卓哉^{1,b)}

概要：医療・介護現場においては、高齢者が失踪や転倒を含む様々なトラブルを発生させることが問題になっている。一方で、看護師や介護士数が不足しており、労働負荷の増大も課題とされている。高齢者の動向を自動的に監視し、緊急時にはアラートにより知らせる仕組みがあれば、看護師・介護士の数が少ない中でも安心、かつ効率的なトラブルの解決が可能になる。本研究では、高齢者に小型のBLEタグを24時間保持してもらい、医療・介護施設の各所にBLEスキャナを設置することで、リアルタイムに必要な精度で経路推定を行う仕組みを提案する。24時間保持でき、1年程度の長期にわたり電源が維持されるためには、BLEタグは十分に小型で、消費電力がかなり低い必要がある。また、施設内でBLEスキャナを配置できる場所も限られており、比較的疎な配置にならざるを得ない。本研究では、このような前提で、必要十分な精度で移動経路を推定できる方法を提案する。また、実際にシステムを設計し、実環境にて評価したのでその結果を報告する。

1. はじめに

近年日本では高齢化が進み、高齢者の割合が増加する傾向がみられる[1][2]。それに伴い病院や介護施設では入院患者や入居者が増加している。そのため看護・介護職員の人手不足が顕在化している。人手不足の中、医療や介護の現場では高齢者の徘徊からの屋外に外出し行方不明になる問題や深夜に高齢者がトイレや廊下などの施設内で体調が悪くなり人が呼べず動けなくなる問題が起きている。これらの問題が早期発見できなかった場合、高齢者の命の危険に関与することがある。屋外に外出し行方不明になる問題は、高齢者が外出を試みようとした時に職員がそれを知り、すぐに対応に当たれば行方不明になることを防ぐことができる。また、高齢者が施設内で体調が悪くなり、その場で人が呼べずに動けなくなる問題は、高齢者に何かあった場合に高齢者の位置情報を知ることができれば早期発見ができる。

これらを実現する一例としてBLEビーコンを用いた屋内位置推定を用いて高齢者を発見するシステムの導入が挙げられる。これにより高齢者が外出を試みた場合やその場で動けない場合に看護・介護職員の持っている端末に通知する。そしてその端末上で高齢者の位置情報を表示するこ

とで、看護・介護職員は位置情報を確認し高齢者のいる現場に向かい対応に当たることが可能となる。

本研究では、医療・介護における問題の解決のために、医療・介護の現場で高齢者の屋内位置を常時把握し、位置情報を基にトラブルを検出して看護・介護職員に知らせる仕組みを提案する。高齢者がBLEビーコンを常時携帯し、施設に設置したスキャナがBLEビーコンからの信号を受信してサーバに送信する。サーバは受信したBLEビーコンの記録等から高齢者のトラブルを検出し、トラブル発生時にアラート通知する。

高精度の位置推定手法は多数提案されているが、それらを看護・介護施設で運用するためには種々の問題がある。まず、高齢者に24時間常時携帯してもらうためには、かなり小型のタグである必要がある。小型タグを長期間バッテリー交換せずに使用する場合には、ビーコン送信間隔を大きくせざるを得ない。この場合には、少ないビーコンから位置推定をすることになり、位置推定精度が低下する問題がある。一方で、小型タグが発する電波を受信するスキャナ(受信機)も、施設内で設置できる場所が限定される。また、コストの問題もあり、スキャナの配置もある程度疎にならざるを得ない。つまり、BLEタグの電波が必ずしも多数のスキャナに受信されない状況で、必要な位置推定精度を保つ方法が必要になる。

この課題に対して本研究では、スキャナ密度が低く、ビーコンの時間間隔が長い場合でも、必要程度の位置推定精度

¹ 和歌山大学システム工学部
Wakayama University, 930 Sakaedani, 640-8510, Japan
^{a)} s236335@wakayama-u.ac.jp
^{b)} tac@wakayama-u.ac.jp

を得られる方法を提案する。まず、本研究ではスキャナとして raspberry pi を導入し、一台のスキャナが5個の BLE アダプタ (内蔵1つと、4つある USB ポートに各1つ) を装備することで、ビーコン1つから5個の RSSI 値を取得することを提案する。同じビーコンであっても複数の BLE アダプタから得られる RSSI 値はばらつくことが観測されており、位置推定精度の向上に貢献する。また、各ビーコンを受信できるスキャナの数が少ない場合には位置推定精度が低下するが、推定位置を時系列に補うことにより、実用上期待される程度の精度で位置、および移動経路を推定する手法を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では関連研究を述べる。第3章では提案するシステムの枠組みについて述べる。第4章では提案する位置推定手法を述べる。第5章で位置推定精度を評価し、最後に第6章で本研究の貢献をまとめる。

2. 関連研究

屋内位置推定に関する研究は多数なされており、CSI (Channel State Information), Fingerprint, AoA (Angle of Arrival), ToA (Time of Arrival) 等、電波到来時に測定される複数の要素に基づいた方法が提案されている [3]。その中でも、受信電波強度 RSSI を用いた屋内位置推定手法は最も基本的な手法である。位置推定に用いる電波の通信方式も、Wi-Fi, Bluetooth, GPS, 携帯電話を始めとして様々なものが考えられるが、屋内では特に高い位置推定制度が求められるため、Wi-Fi や Bluetooth の利用が現実的である。

医療・介護における屋内位置推定においては、コスト面も考慮すると、広く普及した Wi-Fi や Bluetooth による屋内位置推定が現実的である。また、高齢者がタグを24時間携帯することから、現時点では、消費電力の面で Bluetooth の利用が有力と考えられる。Bluetooth による位置推定においては、多数のスキャナが検知できる場合には3点測量 [6] に基づいた計算が有力であるが、スキャナ配置が疎であり、ビーコンを検出するスキャナが少数である場合には、近接度 [7] に基づいた位置推定をせざるを得ない。

疎なスキャナ配置において位置推定制度を高める研究はいくつか存在し、Global Matching を用いた手法 [5] はその一つである。本手法では、屋内地図、およびその内部での移動経路ネットワークを用意し、ビーコン配置ネットワークとの対応関係を考慮することで、移動経路ネットワーク上の移動経路を推定する。具体的には、移動経路ネットワーク上のノード (位置) とビーコン配置ネットワーク上のノード (ビーコン) を重み付け対応させ、得られたビーコン受信系列に対して、ビタビアルゴリズムを用いて最も重みの和が小さい最適な移動経路を計算する。本手法は屋内の移動可能経路を考慮して最適な移動経路推定を行う方

法であるが、ビーコンが届かない場所があり得ることを考慮していないなど、スキャナ配置が本研究の想定よりも密な状態を想定していると考えられる。また、全てのデータが揃ったあとに最適経路を計算するアルゴリズムであり、本研究の想定のようなリアルタイムの位置推定を行うことができない。

3. 提案システムの枠組み

3.1 高齢者看護・介護施設における要求

病院の入院患者や介護施設では、高齢者が長期間生活することがあり、看護・介護を効率化するためにトラブルの自動検出が求められる。病院では入院患者が無断で病院から出ることがあり、認知症などの場合には行方不明になるリスクがある。外出検知のための機器は商用販売されており、ビーコンタグがある場所を通過するとアラーム音が鳴動する等の通知機能があるが、そもそも高齢者がビーコンタグを部屋に忘れることがある等の問題があり、十分に機能しているとは言えない。介護施設では、多くの場合に、外へのドアには鍵がかかっており勝手に外出はできない。しかし、ベッドから降りるときや、その後車椅子に乗る時、移動する時等に転倒するリスクがあり、また、トイレでも助けが必要になる。このため、高齢者が特定の移動行動を起こすときに看護・介護職員がそれを知りたいという要求がある。高齢者の屋内位置を常時把握し、必要なときに看護・介護者に知らせることができれば、上記の要求は満たすことが可能である。

屋内位置を常時把握するためには、まず、高齢者に24時間ビーコンタグを持ってもらう必要がある。病院や介護施設により状況が異なるため、各施設に合致した実現可能な方法でこれを実行する。もし高齢者が名札を常につけているならば、名札にビーコンをつければ良いので簡単である。しかし、名札をつけない場合も多い。病院では、バーコードを印刷したタグを手首に巻くことで本人確認をする場合がある。この場合には、このタグにビーコンタグを貼り付けると良いが、その場合には、ビーコンタグはかなり小さい必要がある。名札も手首のタグもない場合には、靴等に貼り付けることになる。この場合にも、ビーコンタグはかなり小さい必要がある。

一方で、ビーコンタグのバッテリーは実運用において大きな問題である。頻繁に電池交換が必要であれば業務に差し支えるため、できるだけ長期間、交換なしで稼働するのが好ましい。しかし、一般に小型であればバッテリー容量が小さく、大きさとバッテリー容量を両立させるためには、ビーコンの時間間隔を長くとり他に方法はない。本研究では、これらのバランスをとり、ビーコンタグとして mamorio [8] を選定した。mamorio は 19x35x3.4mm の小型ビーコンタグで、約1年間の寿命をもち、約3秒間隔でビーコンを送出する。

建物内にビーコンを受信するビーコンスキャナを設置する必要がある。しかし、一般にスキャナは電源のあるところにしか設置できない。また、コスト面からも、必要以上の数を設置することは避けるべきである。よって、推定したい位置の近辺に重点的に設置することとして、ビーコンを常に3つ以上のスキャナで捉えることが困難な、疎なスキャナ配置が前提となる。

このような、長いビーコン間隔、疎なスキャナ配置を前提として、移動経路が判別できる程度の位置推定精度を実現することが求められる。

3.2 提案システムの枠組み

提案システムの全体像を1に示す。本システムは病院や介護施設で利用するシステムである。本システムは、「BLE ビーコンタグ」「スキャナ」「サーバ」「端末」の4つの要素から構成される。BLE ビーコンタグとして、24時間身に付けられるように小型のデバイスを用い、現場の状況に応じて、高齢者の手首のタグや名札、靴等に取り付けるなど工夫する。スキャナは、典型的には Raspberry Pi 等の小型端末を用いて実装し、多くの場合には電源コンセントの近辺に設置することになる。スキャナは、建物内の移動履歴を取得したい領域に、必要な粒度の位置推定ができるように計画的に配置する。スキャナは、ビーコンを受信すると、その記録をサーバに転送する。サーバは当該施設に設置しても良いし、施設外に設置しても構わない。サーバ内のデータベースにビーコン受信履歴を蓄積する。看護師や介護士が用いるタブレット端末等を用意し、ナースステーション等の仕事に通常待機する部屋に設置する。もしくは、スマートフォン等の携帯端末を各自が携帯しても構わない。これらの端末にはプッシュ通知ができる必要がある。サーバが何らかのトラブルを検出した場合には、サーバからのプッシュ通信によりタブレット、またはスマートフォンにアラートを通知し看護・介護職員に伝える。必要に応じて、通知された端末に詳細なアラート内容や、地図を用いた位置情報や直近の移動履歴の提示を行っても良い。通知を受けた看護・介護職員は、その内容に応じて対応を行うことで、トラブル発生後速やかに対応を行うことができる。

3.3 スキャナへの複数の BLE アダプタの搭載

先述の通り、小型かつ長寿命の条件を満たすために、現場で使うビーコンタグは、どうしてもビーコン送信間隔が長くなり、これが位置推定の精度を低下させる。この問題への対策として、本研究では、複数の BLE アダプタをスキャナに接続する。一般に BLE スキャナとして Raspberry Pi が用いられることが多いが、Raspberry Pi には4つの USB ポートが存在し、これらに外付け用の BLE アダプタを接続すれば、内蔵の BLE アダプタと合わせて合計で5つの

BLE アダプタを搭載できる。図2に試作システムの写真を示す。手前に見える Raspberry Pi がスキャナであり、4つの BLE アダプタが搭載され、青 LED が光っている。

4. 疎なスキャナ配置を前提とした位置推定手法

4.1 概要

本研究では、疎なスキャナ配置で、かつビーコン送信の時間間隔が長い場合を対象として、実用できる精度で移動経路を推定する手法を提案する。ハードウェア面の工夫として、ビーコンスキャナに複数の BLE アダプタを接続することで、一つのビーコンに対して、複数の RSSI 値を取得して平均することで、RSSI 値から推定される距離の誤差を誤差を削減する。その上で、スキャナ配置が疎であるため、一つのビーコンを受信できるスキャナが少ない問題を解決する。提案手法では、屋内マップ上の移動経路をグラフ状に限定し、その上のみを人が移動すると仮定する。受信されたビーコンの RSSI 値から、スキャナからの距離を推定し、移動経路上で可能性のある位置を限定する。その上で、時系列の推定位置系列を照合し、歩行速度で移動する場合に、移動経路として矛盾がないような推定位置系列を確定する。一般的には、3つ以上のスキャナがビーコンを受信しなければ正しい位置推定はできないとされるが、提案手法では、移動可能経路の限定と、時系列の移動可能性判定により、受信できるビーコン情報が大幅に限定された状況でも、実用精度の位置推定を実現する。

4.2 データ

本研究で想定する入力データは、屋内マップ上の移動経路グラフと、各スキャナのビーコン受信記録である。

移動経路グラフは、屋内マップ上に設定されたグラフであり、屋内マップ上の移動可能な経路を表す。頂点はマップ上に座標を持ち、2頂点を結ぶ枝は頂点間を結ぶ直線として表現される。つまり、枝がある直線上を人が歩くことを仮定する。移動経路グラフの例を4に示す。この例のマップは、評価実験で用いる介護施設の、あるフロアの屋内マップであり、上部のレクリエーションルーム、食堂、談話室の部分は仕切りのない広間である。廊下や広間に、このように移動経路を設定することで、実用できる水準で屋内移動経路を把握できる。

スキャナのビーコン受信記録は、ビーコンが BLE アダプタに受信される度に生成されるタプルの集合である。各タプルは値として、受信時刻、スキャナ ID、ビーコンタグ ID、BLE アダプタ ID、受信強度を持つ。つまり、生データにおいては、送信されたビーコンがあるスキャナに受信されるたびに、最大5つのタプルが存在する。本研究では、前処理として、一つの送信ビーコンに対応するタプルが3個以上である場合のみを抽出し、それらをまとめて1タ

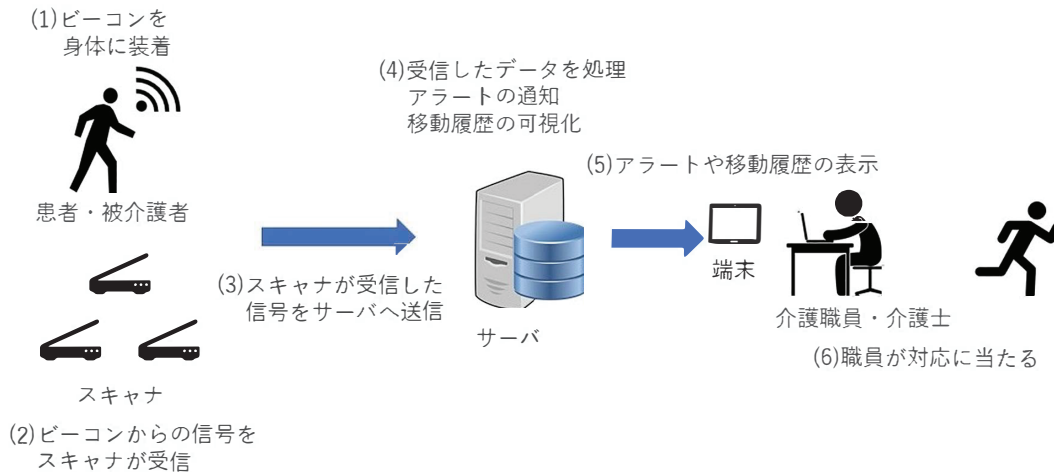


図 1 提案システムの枠組み



図 2 BLE アダプタを 4 つ増設した Raspberry Pi

プルとする。前処理後のタプルは受信時刻、スキャナ ID、ビーコンタグ ID、受信強度を持ち、受信時刻と受信強度は、対応する元のタプルの平均値とする。

4.3 仮推定位置集合を求める

提案手法ではまず、移動経路グラフを考慮せずに、屋内地図上の推定位置の集合を求め、これを仮推定位置集合とする。このために、位置推定をする時間枠を設定する。時間枠の長さを T 秒とし、 T 秒毎に時間枠を設け、各時間枠内のタプルから、その時間枠の推定位置集合を求める。

ある時間枠 t において収集されたタプルの集合 M_t を考える。この時間枠においてビーコンを観測したスキャナの数により場合分けをして、仮推定位置集合 P'_t を計算する。具体的な計算方法を以下に示す。

- (1) 3 つ以上のスキャナが観測した場合: M_t から、三点測量の要領で位置推定を行う。つまり、Friis の公式に従って各スキャナからの推定距離を求め、推定距離の二乗誤差が最小になるように推定位置を 1 つ定める。
- (2) 2 つのスキャナが観測した場合: Friis の公式に従って各スキャナからの推定距離を求める。対応する 2 つの円が交差する点を 2 つ求め、これらを仮推定位置集合とする。
- (3) 1 つのスキャナが観測した場合: この場合には、仮

推定位置集合は、対応する円の円周上の全ての点となる。

- (4) ビーコンが観測されなかった場合: 仮集合位置集合は空集合とする。

4.4 推定位置集合を求める

次に、仮推定位置集合から、対応する移動経路グラフ上の点を求め、推定位置集合を求める。時系列に隣接する時間枠の時間差から、その時間差で移動可能な最大距離を D とおく。仮推定位置集合の各点 $p' \in P'_t$ に対し、 p' を中心とした半径 D 以内の点で、移動経路グラフの枝上にあり、最も p' に近い点を推定位置 p とする。仮推定位置集合の全ての点 p' に対して推定位置 p を求め、その集合を推定位置集合 P_t とする。

4.5 推定移動経路を求める

推定移動経路とは、連続する時間枠の系列に対して求められた推定位置の系列である。ここで、推定移動経路に含まれる各時間枠 t に対して、推定位置集合の要素は一つであることが望ましい。前節では、推定位置を一つに絞れない場合には複数の推定位置候補を許容し、推定位置を集合として扱った。これに対して、推定移動経路の計算においては、時間が経過し移動経路の情報が増すことで過去の推定位置を絞り込める可能性があることから、過去に遡って、推定位置集合からあり得ない推定位置を削除する。

手順を説明する。時間枠 t に対して、推定位置集合 P_t を求めたとする。時間枠 $t-1$ の推定位置集合の要素 $p_{t-1} \in P_{t-1}$ に対して、どの $p_t \in P_t$ も距離 D 以内にはない場合には、時間枠 $t-1$ の位置が p_{t-1} であった可能性はないことになる。よって、 p_{t-1} を P_{t-1} から削除する。 P_{t-1} の要素が削除された場合には、同様に、 P_{t-2} の要素で、 P_{t-1} のどの要素の距離 D 以内にもないものがあれば、 P_{t-2} から削除する。このように、削除する要素がなくなるまで過去に遡っ



図 3 ビーコンタグ (mamorio fuda)

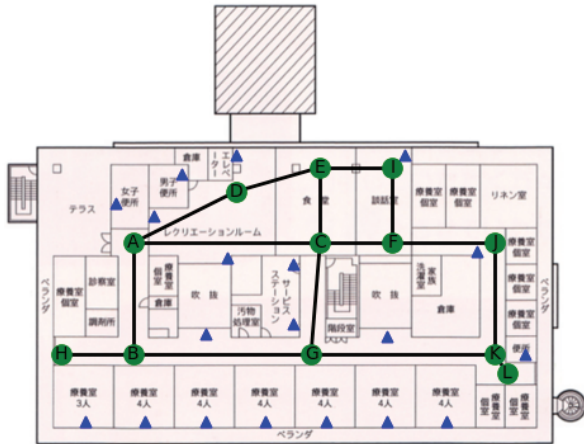


図 4 屋内地図

て同様の処理をする。

5. 評価

5.1 評価方法

和歌山市内の老人ホームに提案システムを設置し、BLE ビーコンタグを持って建物内を移動することで、BLE ビーコンタグが発信するデータをスキャナで受信した結果を得た。BLE タグとして mamorio fuda (図 3) を用いた。BLE スキャナとして Raspberry Pi3 Model B+ を使い、4 つの BLE アダプタ (ELECOM LBT-UAN05C1) を接続した (図 2)。評価に用いた老人ホームの屋内地図を図 4 に示す。図の三角印はスキャナの設置位置を表し、A~L の頂点とそれらの間の枝で構成されるグラフは、設定した移動経路グラフを表す。また、図 5 に、BLE タグを持って移動した移動経路を示す。この経路を約 10 分でゆっくりと歩行し、データを取得した。位置の真値は、図の頂点部分で秒単位で時刻を記録しておき、枝上は等速直線運動をしたと仮定して計算した。

5.2 受信電波強度の分散

まず、スキャナに複数の BLE アダプタを接続することの効果を検証する。複数の BLE アダプタを接続しても、同じ BLE ビーコンを受信したときの受信強度がどの BLE アダプタでも同じであれば、位置推定誤差は小さくならない。実際に複数の BLE ビーコンで測定した結果を調べることで、効果を検証した。

図 6 に、ビーコン一つを受信した際の RSSI のばらつきを示す。歩行時の受信データから、各スキャナにおいて同一ビーコンを受信した受信記録を特定し、4 つ以上の受信が

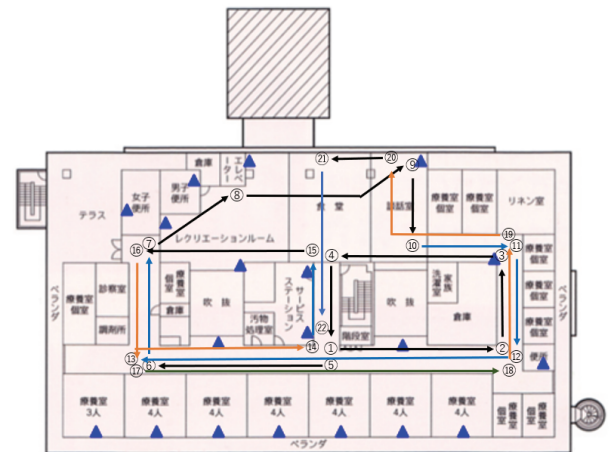


図 5 移動経路

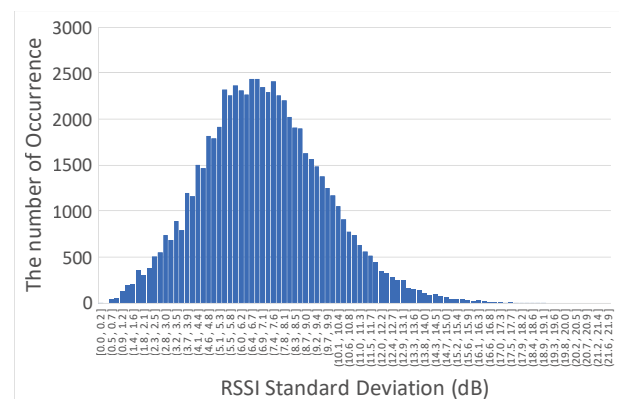


図 6 RSSI の分散の分布

確認されたものに限定した上で、それらの RSSI 値の標準偏差をヒストグラムとして示した。この図から、同じビーコンを受信した結果にも関わらず、RSSI 値にはかなりのばらつきが見られることがわかる。RSSI 値の標準偏差の平均は 7.10 であった。この結果から、RSSI 値の誤差は少なくとも受信時には発生することがわかり、複数の BLE アダプタで観測し、平均をとる等の処理により、測定誤差を低減できる効果があることがわかる。

5.3 位置推定精度の評価

次に、位置推定精度の評価を行う。図 7 に、最終的な位置推定精度を示す。場所によって位置推定精度が異なっているが、平均的には 5~10 メートル程度の誤差になることがわかる。開始から 6~7 分あたりの誤差がかなり大きくなっているが、これは、G 地点から C 地点に移動する際に、誤差の影響で移動方向の誤りが生じており、C, A, B 地点を通して G 地点に戻るまでの間は経路を正しく推定できていなかったことが原因であった。誤差により初期段階で推定経路を誤った場合に、正しい経路に復帰する方法を検討する必要があることがわかる。

図 8 は、仮位置推定の結果を示している。仮位置推定の結果は平面上に広く分布しており、人間が移動できない場

所も多く、建物内をどのように移動して、何をしたのか等の情報を取得しにくいであろうことが想像される。また、地点 G,C,A,B で囲まれる区域に推定された点が多いことがわかる。これは、6~7 分に大きな誤差が生じた原因になった領域であるが、この部分は真ん中が吹き抜けになっており、電波が通りやすいために、この領域の反対側のスキヤナがビーコンを測定したことで誤差が発生している。

図 9 は、仮位置推定の結果を、移動経路グラフ上の位置に対応付け、時系列にも整合をとった結果である。推定精度から想像すると、正しい位置を推測できていない場合も含まれているが、このような形で経路に沿って位置推定ができれば、屋内の高齢者の行動をある程度把握することができ、部屋から出たり、トイレに近づく等の行動が推定しやすくなるものと考えられる。

図 10 は、位置推定の結果を基に移動経路を推定した結果である。図 5 に示す実際の移動経路と比較すると、多少の相違は見られるが、移動経路をほぼ正しく推定できていることがわかる。

6. おわりに

本研究では、病院や介護施設において高齢者のケアを高度化・省力化するための移動経路推定手法を検討した。高齢者に 24 時間身につけてもらうためには、ビーコンタグの大きさの制約があり、電池交換頻度を十分に少なくするためには、ビーコン送信の時間間隔を大きくせざるを得ないことを指摘した。また、設置コストや電源コンセントの位置等の制約から、ビーコンスキヤナの配置も疎になる制約があることも指摘した。その結果として RSSI に基づいた位置推定精度が低下するため、実用水準の位置推定を行うためには、従来手法にはない新たな工夫が必要となる。

本研究では、その解決のために、ビーコンスキヤナに複数の BLE アダプタを搭載する方法を提示した。BLE アダプタを複数搭載することで、RSSI 値のばらつきを抑えることができ、位置推定誤差も低減できることを示した。また、屋内地図上の移動可能経路を限定するために、移動経路グラフを作成し、その枝の上のみを移動すると仮定することで、ビーコン頻度が低く、スキヤナ配置が疎な場合でも、屋内の位置推定ができる位置推定手法を提案した。評価として、実際に老人ホームに実機を設置し、移動経路推定を行い、位置推定精度を評価した。

今後の課題は、RSSI の誤差に起因して起こる移動経路の誤りを回復する仕組みを組み込むことである。また、さらなる位置推定精度の向上も課題である。

謝辞

本研究活動は、文部科学省による Society 5.0 実現化研究拠点支援事業によって行われたものである。

参考文献

- [1] "高齢者の人口", <https://www.stat.go.jp/data/topics/topi1131.html> (参照 2020-01-21).
- [2] "内閣府 高齢化の状況", <https://www.cao.go.jp/index.html> (参照 2020-02-05).
- [3] Faheem Zafari, Athanasios Gkelias, Kin K. Leung, A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, Vol. 21, No. 3, pp.2569–2599, 2019.
- [4] Harald T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons, May, 1946, pp 254–256.
- [5] 山本大介, 田中亮佑, 梶岡慎輪, 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, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウム, pp.1027–1034, 2019.
- [6] R. I. Hartley and P. Sturm, Triangulation, Comput. Vision Image Understand., 68-2 November 146-157, (1997).
- [7] J. Krumm, and K. Hinckley: The NearMe Wireless Proximity Server, Proc. 6th International Conference on Ubiquitous Computing, (2004).
- [8] "mamorio", <https://mamorio.jp> (参照 2020-01-24).

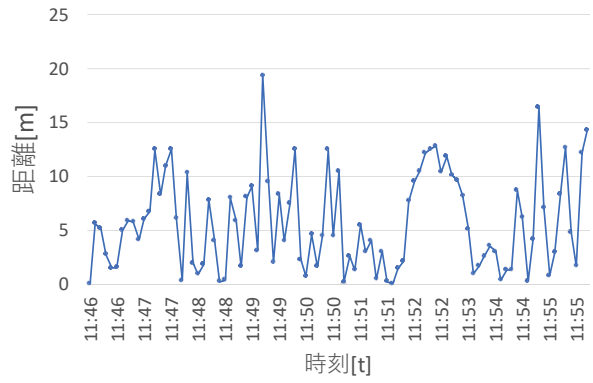


図 7 位置推定精度

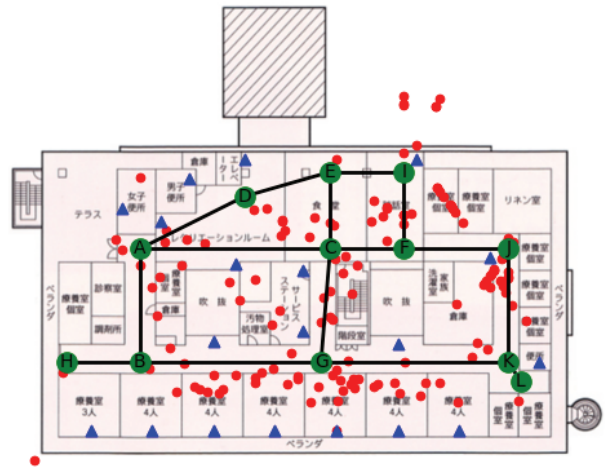


図 8 仮位置推定の結果

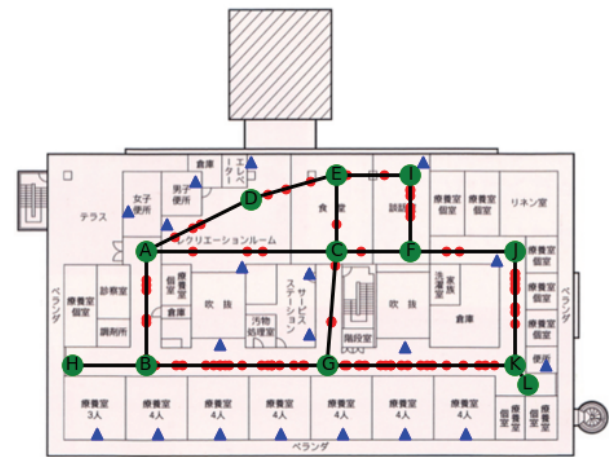


図 9 位置推定の結果

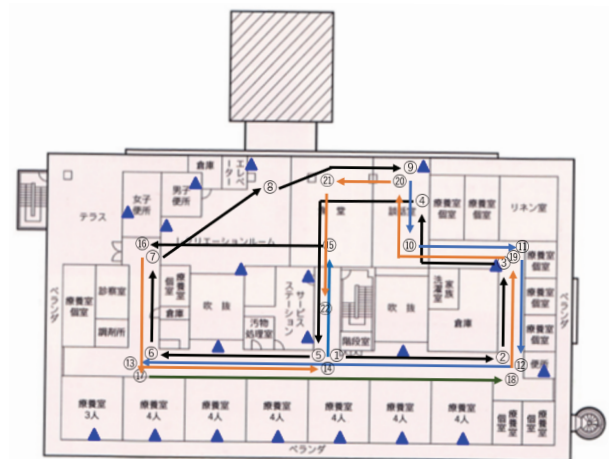


図 10 経路推定の結果