

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

駒井 清顕¹ 藤本 まなと¹ 荒川 豊¹ 諏訪 博彦¹ 安本 慶一¹

概要：近年、高齢者人口の増加に伴い、介護における負担が増加してきている。特に、病院や老人ホームにおける介護対象者の徘徊が重大な問題となっており、医師や看護師の負担を大幅に増大させている。このような背景から、これまで数多くの介護対象者見守りシステムが提案されてきたが、介護対象者（被監視者）のどこで何をしているのかをリアルタイムに把握することが難しく、効果的な手法といえるものは未だ数少ない。また、既存の研究の多くは被監視者に対し、スマートフォンの所持や特定のアプリケーションを強いるなど被監視者における負担が多く、そういった操作に不慣れである高齢者を対象とする場合には実用的ではない。本研究では、被監視者に負担をかけることなくその居場所を推定するシステムを提案する。提案システムでは、iBeacon 送受信機を用いて、受信信号強度 (RSSI) の値から、屋内における大まかな位置情報の収集を行う。iBeacon を利用した位置推定では RSSI がランダムに変化するうえ、距離が遠くなると減衰が激しくなるため位置推定の精度を出すことが難しい。そこで今回は空間を数 m 区画に区切り、領域ごとに iBeacon 受信機を設置し RSSI 減衰モデルから割り出した閾値を利用することで、領域ごとに存在する可能性を割り出す。検証実験では iBeacon の RSSI のみでユーザの移動軌跡を推定できたことから、提案システムは負担の少ない見守りシステムの構築に大きく貢献することが可能であると考えられる。

1. はじめに

近年、日本における高齢者の割合は年々増加してきており、今では国民の4人に1人が65歳以上の高齢者となっている[1]。高齢者の増加に伴い、病院や老人ホームにおける医療従事者や看護師など職員の負担も増えている。これは職員の慢性的な人手不足が主な原因であり、少人数で大勢の患者や入居者の介護を行う必要があるというのが現状である。

これらの現場で働く職員を悩ませる問題の1つに患者の徘徊がある。少人数で大勢の介護を行う必要がある状況下において、患者の徘徊というのは、当人を危険な環境に晒してしまうばかりか、介護者の負担を大幅に増大させるおそれがある。従って、病院や老人ホームにおいて、介護における負担を減少させることができる見守りシステムの早急な開発が求められている。

見守りシステムの開発において最も重要なことは、「いつ・どこで・誰が・何をしているのか」を知ることである。これを実現するには、特に介護対象者の位置情報を知る必要があり、これまで多くの研究やサービスの開発が行われてきた。例えば、家庭内に設置された Wi-Fi 基地局を利

用し、その信号強度から住人の位置を推定するもの[3]、超音波センサを多数設置するもの[4]、ユーザがビーコンキーホルダのようなデバイスを持ち、そのシグナルを複数人が所有するスマートフォンで記録するサービス[2]などが挙げられる。しかし、これらの研究は、計測にあたって多数の Wi-Fi 基地局を設置する必要があったり、計測機器を持つ姿勢が制限されたり、環境にスマートフォンを設置する必要があったりと、設備を設置する負担や計測にかかる負担が大きという問題があり病院や老人ホームへの導入は現実的ではない。また、複数人が同時に同じ空間に存在する際に、それらの人の行動・位置を別々に認識することも非常に困難であり、解決すべき課題である。

本稿では、これらの病院や老人ホームといった、一般家庭よりも広い環境下において、複数人の見守り対象者の位置を推定するシステムを新たに提案する。提案システムは、見守り対象者が所持する iBeacon と呼ばれる Bluetooth Low Energy (BLE) の信号を定期的に発信する端末と見守りを行う環境に設置された複数の受信機からなり、計測された信号受信強度のみで見守り対象者の存在領域を推定することが可能となっている。本稿における新規性と貢献は以下の2点である。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

・環境への受信機設置 (新規性)

上でも述べたが、BLE を利用したサービスの多くが環境に発信機を設置し、利用者が受信機を持って移動する形をとっている。受信機としてはスマートフォンが広く使用されているが、見守り対象者である高齢者にとっては慣れない機器を使用するという点で負担が大きく、今回想定する環境においては導入することが難しい。また、見守り対象者が発信機を、環境に受信機であるスマートフォン設置するサービスも多少は存在しているものの、決して安価であるとはいえないスマートフォンを発信機と同様に環境に複数設置するというのは現実的ではない。そこで提案システムでは、この問題を解決するために、Raspberry Pi を利用して低コストな受信機を開発した。受信機のコストを下げられたことによって、これまでは実現することが難しかった計測を容易に実現することが可能となる。

・見守り対象者の負担軽減 (貢献)

従来のシステムではスマートフォンのような受信機を常に携帯する必要があり、サイズや重量のある端末の携帯、充電やアプリケーションの操作といった作業を強いるという観点から、見守り対象者にとって負担が大きい。これらの問題点を解決するために、提案システムでは発信機としてサイズの小さい iBeacon を採用している。iBeacon はボタン電池や乾電池 1 つで数年間信号を発信し続けることが可能であるだけでなく、そのサイズも小さく、特定の作業を強いることも無いことから、見守り対象者に負担を感じさせることなく見守りを行うことが可能である。

評価実験として、2 種類の移動 (直線的な移動、平面的な移動) データの計測を行い、提案システムを適用しその有効性を検証した。その結果、提案システムで見守り対象者の存在領域並びに移動軌跡を追跡可能であることを確認した。

2. 関連研究

近年、BLE デバイスが普及してきたことにより、それを利用した研究が行われるようになってきている。

Zhu らは、オフラインの学習とオンラインの訓練を組み合わせた、BLE の RSSI による屋内位置推定手法を提案している [5]。この手法では、不安定な RSSI 値に対して、重み付き時間窓を適用する事でその不安定さを軽減させるだけでなく、定期的に RSSI 減衰モデルの更新を行うことでその位置推定精度を向上させている。この手法によって 80 % の確率で、屋内における位置情報を 1.5m 以内の精度で推定することが可能である。しかし、事前のモデル構築や定期的なモデルの更新というのは導入におけるコストが非常に大きいことから、手軽に導入するのは困難である。

石塚らは BLE シグナルと PDR を組み合わせたハイブリッド屋内位置測位手法の検討を行っている [6]。ここで

は、大規模な展示会場に密に BLE シグナルを発信するデバイスを設置し、ユーザの保有するスマートフォンにて BLE シグナルの受信状況を計測する実験を行っている。多くの人が存在している環境下においては、RSSI 値に非常に大きなゆらぎが生じることが懸念されており、実際に実環境での実験を行った結果、BLE 単体による位置推定には 10m ~ 20m の誤差が生じている。従って、BLE シグナルを位置推定に利用する場合には、ユーザの所有するスマートフォンに内蔵された加速度センサの情報をもとにした PDR による補正をおこなう手法が提案されているが、スマートフォンに内蔵されたセンサを連続駆動させる必要が有ることから、長期的な見守りが必要な条件下においては適していない。

3. 存在領域推定の要件と、基本方針

本章では、提案システムを実現するにあたり満たさなければならない要件と、存在領域を推定する為の基本方針について述べる。

3.1 要件

本研究では、病院や老人ホームといった環境下において、複数人の存在領域並びに移動軌跡を、見守り対象者にストレスを感じさせることなく推定することが出来るシステムの実現を目指す。従って、見守り対象者への負担を最小限に抑えつつも、簡単に環境を構築できるシステムにしなければならない。そのため、本システムの要件を以下のように定める。

- 要件 1 医療従事者の負担を最小限に軽減できること
- 要件 2 見守り対象者に特定の作業を強要しないこと
- 要件 3 広範囲、かつ様々な環境で使用できる拡張性を備えていること

今回は BLE の受信信号強度 (RSSI) を利用したものに着目した。関連研究でも述べたが、BLE 単体を利用して高精度な位置推定を行うのは非常に難しいため、何かしら他の手法と組み合わせる使用するというのが一般的である。しかし、見守りということに重点を置く場合、見守り対象者の正確な位置情報を推定することよりも、いつ、どこで、誰が、何をしているのかを推定することが重要となる。従って、今回想定する環境においては、正確な位置情報は推定することが出来ないものの、複数人の行動を容易に切り分けることが可能であり、かつ省電力で数年間運用することが可能な iBeacon が最適であると考えられる。

近年普及しつつある、iBeacon を利用したサービスの多くは、ユーザが環境に設置された iBeacon からの情報を受信できる端末を所持している必要があるという欠点がある。近年販売されているスマートフォンであれば何ら問題なくサービスを楽しむことが可能であるが、今回想定する環

境では、スマートフォンの利用が制限されるあるいはそもそも所持していない人が多いと考えられるため、導入が難しい。

そこで提案システムでは、環境側に受信機を設置し、ユーザ側に発信機を持たせることで導入における問題を解決した。スマートフォンと比較して、iBeacon 発信機は安価に入手することが可能であり、かつサイズも比較的小さいため、所持する人が負担を感じにくく、充電、あるいは電池交換の手間も少ない。これは、上記で述べた要件 1 と要件 2 を満たすことになる。

また、受信機は受信した信号のデータを蓄積、データベースへと送信する機能を有している必要があることから、安価にこれらの機能を容易に実装することが可能である Raspberry Pi を使用した。データベースへのアップロードは WiFi を利用するため、設置する環境には WiFi 環境が必要となるが、WiFi 環境が整ってさえいれば、見守りを行いたいエリアに Raspberry Pi を設置するだけで環境を構築することができる。つまり、これは上記で述べた要件 1 と要件 3 を満たすことになる。

これらの要件をまとめた提案システムの概要を図 1 に示す。

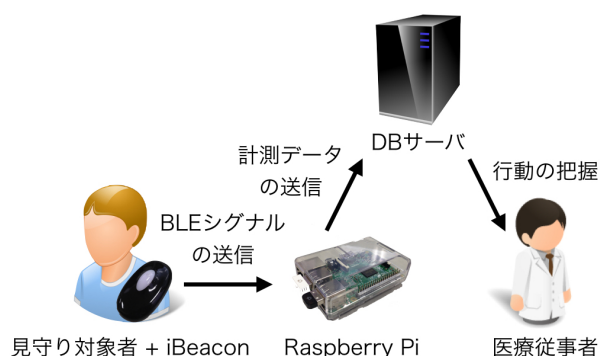


図 1 システム概要図

3.2 領域推定のためのアイデア

BLE と Raspberry Pi を利用することで安価に存在領域を計測する環境を構築することが可能であるのは上で述べたが、幾つか解決しなければならない課題が存在している。その課題というのは

- 課題 1 どれくらいの受信機を設置する必要があるのか
- 課題 2 どのようにして存在領域の絞り込みを行うかの 2 つである。

課題 1 に関しては、手軽に導入できるとはいえ、コスト及び設置する手間の問題から、密に設置して正確な位置を取る手法は採用できないため、必要最低限の受信機で領域

を推定出来るようにしなければならない。従って、提案システムで識別することの出来る範囲を事前に導き出しておく必要がある。また、課題 2 に関しては、RSSI 値が安定している場合には複数点から計測された RSSI を元に三辺測量をすることでおおまかな位置を推定することが可能となる。しかし iBeacon の RSSI 値は、非常に安定性に欠ける上、今回の場合においては特定の空間に大量の受信機を置くことは想定していないため、三辺測量法を使用することは難しい。従って、RSSI 値に対して補正をかける上でその値と受信機の配置状況を元に存在領域の絞り込みを行う必要がある。

3.3 提案システムの設計

以上の節で述べてきたことを踏まえ、提案システムを設計した。提案システムは以下の 4 つのステップから構成される。

- ステップ 1 発信機の RSSI 減衰モデルの作成
- ステップ 2 実空間での計測
- ステップ 3 計測データの補正
- ステップ 4 実座標を考慮した存在領域の推定

ステップ 1: 発信機の RSSI 減衰モデルの作成

ステップ 1 では、見守り対象者に所持させる発信機の RSSI について減衰モデルの作成を行う。

RSSI の出力値は非常に不安定であるため、モデルの構築にあたっては以下の 3 つの条件を設けて作成を行った。

1. 発信機を床から一定の高さに固定する
2. 受信機から 0m ~ 15m の間で 1m 間隔で計測点を設ける
3. 各観測点で 10 秒間静止する

ステップ 2: 実空間での計測

ステップ 2 では、ステップ 1 で作成した RSSI 減衰モデルをもとに実空間に設置する受信機間の距離を決定する。RSSI 値は、一定の距離を超えると急激に減衰するため、急激な減衰が始まる点を RSSI のしきい値、減衰が始まる距離を距離のしきい値に設定する。また、受信機を設置する間隔に関しては、存在領域を推定するにあたって候補領域が重複する可能性を避ける為に、先ほど定めた距離に数 m 程の余裕を持たせた位置に設置する。

ステップ 3: 計測データの補正

ステップ 3 では、各受信機にて計測された RSSI 値に対して、推定を行うための補正を行う。補正の詳細に関しては 4 章で述べる。

ステップ 4: 実座標を考慮した存在領域の推定

本ステップでは、ステップ 2 にて設定した RSSI のしきい

値以上の値が計測された受信機の設置エリアを存在領域の候補とする。候補領域が複数存在する場合には、より RSSI 値が小さい地点を存在領域として設定する。

4. 計測データの補正

本章では、各受信機にて計測された値を比較出来る形に補正する手法に関して説明する。

提案システムでは、補正に以下の2つのステップを要する。

ステップ1 RSSI 値の平滑化

ステップ2 受信機の間でのタイムスタンプの同期

ステップ1: RSSI 値の平滑化

計測される RSSI 値は変動が非常に大きく、特定の時間において計測された値をそのまま使用することは存在領域を推定するにあたって誤推定を引き起こす原因となる。従って、計測を行う際には、RSSI 値の変動の影響を少なくするために平滑化を行う必要がある。提案システムでは、iBeacon が非常に短い間隔で信号を発信していることに着目し、計測されたデータが一定数貯まるたびにそれらの相加平均を求め、RSSI 値の平滑化を行っている。

ステップ2: 受信機の間でのタイムスタンプの同期

受信機である Raspberry Pi は様々な場所に設置されているため、発信機の信号が到達するまでに時間差が生じる。それに加えて、発信機と受信機間の距離が離れると実際には信号が発信されているにもかかわらず受信することが出来ないという問題が発生するほか、各受信機では、受信した信号に対して相加平均を行っているため、特定の信号に対して受信機ごとのタイムスタンプの同期をとることが非常に難しくなっている。したがって提案システムでは、見守り対象者が1秒未満で現在位置を大幅に移動する事例は考えにくいと想定し、ユーザーの存在領域を判定する間隔を1秒間隔に設定した上で、ステップ1で平滑化されたデータに対して、1秒間の間に計測されたデータの相加平均を取ることによって、秒単位でのタイムスタンプの同期を行っている。

5. 実験

本章では、提案システムの妥当性を検証するために行った予備実験について述べる。

5.1 実装及び実験環境

はじめに、今回実験の実験で利用したデバイスについての説明を行う。

今回の実験においてはその妥当性を検証する為に、発信機を所持する見守り対象者が任意の時刻において、どの領域に存在していたか、またどのような移動軌跡をたどった

のかという正解データを取得することが必要となる。これらの情報を取得する為に、iBeacon の信号を発信する以外に、発信を開始した時刻、終了した時刻、任意のノードに接近した時刻を記録可能な iOS アプリケーションを実装した。このアプリケーションを iPhone5 にインストールし、事前に設定したシナリオに沿って歩くことで実験を行った。ユーザは計測開始時に発信ボタンをオンにすることで信号発信を開始することが可能であり、実験時には環境に設置した受信機に接近した際に記録ボタンを押すことで、ボタンを押した時刻が記録される。

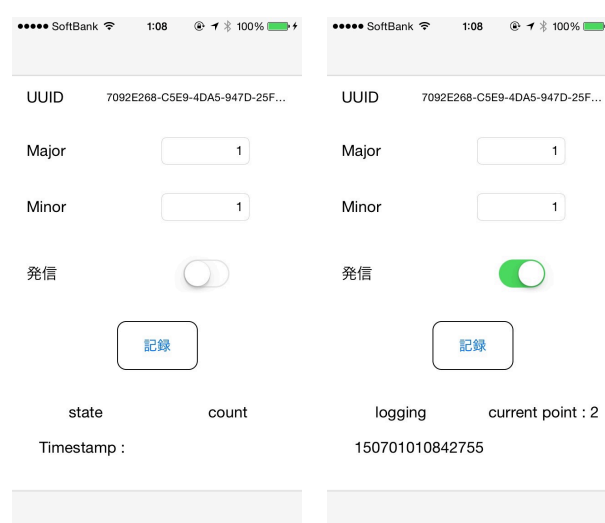


図2 アプリケーション UI

受信機に関しては、Raspberry Pi 単体では、iBeacon の信号を受信することが出来ず、またネットワークに接続することも出来ないため、図3のように BLE シグナルを受信可能な Bluetooth ドングル (Planex BT-Micro 4) と WiFi ドングル (Planex GW-USNANO2A) を接続し、データの送受信が出来る環境を整えた。受信した iBeacon の信号に関してはその信号から得られる様々なパラメータを記録し、csv 形式で保存するようにした。今回の取得したパラメータは下記の表1にまとめた。



図3 Raspberry Pi を利用した iBeacon 受信機

表 1 取得したパラメーター一覧

パラメータ	説明
Time	信号を受信した時刻 (ミリ秒単位で取得)
UUID	識別子
Major	識別子
Minor	識別子
MeasuredPower	送信機の 1m 地点での受信電波強度 (定数)
RSSI	受信電波強度 (dBm)
Proximity	距離の精度 (immediate, near, far)
Accuracy	発信機までの距離 (m)

これらのパラメータは受信信号から直接取得することが可能なものである。

次に、実験を行った環境と設定に関する説明を行う。今回は2つの移動パターンを想定し実験を行った。実験は図4に示す直線的な廊下と、図5に示す大部屋の2箇所で行った。想定した移動パターンは下記の通りである。

移動パターン 1 一定方向のみの直線的な移動のみを行う

移動パターン 2 任意の方向への平面的な移動を行う

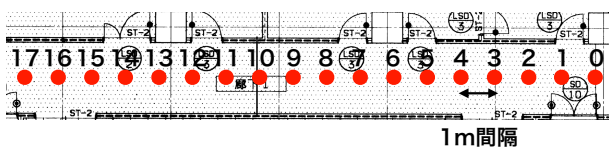


図 4 実験環境 1

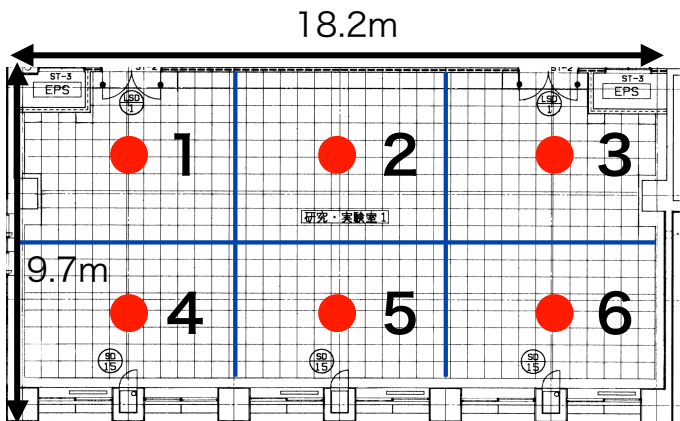


図 5 実験環境 2

移動パターン 1 は提案システムで移動軌跡を取ることが出来るかを検証するためのシナリオである。受信機を直線的に、1m 間隔で設置し、歩行速度を落とした上で提案システムにて存在領域及び移動軌跡を推測することが可能かどうかを検証した。提案システムの妥当性を検討することが目的であったため、RSSI 値の変動の要因となる要素を出来る限り取り除くため、計測環境として遮蔽物の少ない廊下を選択した。また持ち方の違いによる影響をなくすため、発信機を台車上に固定し移動させた。図4に記載する赤い丸は受信機が設置された箇所を表しており、受信機には

右から順番に 0, 1, 2, と番号が振られている。

移動パターン 2 は実環境を考慮し、あえて受信機の個数を減らしたシナリオである。縦 9.7m、横 18.2m の空間を 6 分割し、分割した領域に固有の識別子を割り振り、領域内に 1 つだけ受信機を設置した。その上で縦方向並びに横方向への往復を含む移動を行い、移動軌跡を追跡することが出来るかを検討した。より実環境に近い状況を想定したため、環境として遮蔽物の存在する部屋として研究室を選択し、発信機を手に所持して実験を行った。

5.2 実験結果と考察

実験を行う前段階として、図4に示した環境にて、4章で示した RSSI 減衰モデルの作成方法にもとづいて、発信機の RSSI 減衰モデルを作成した。減衰モデルは図6となる。

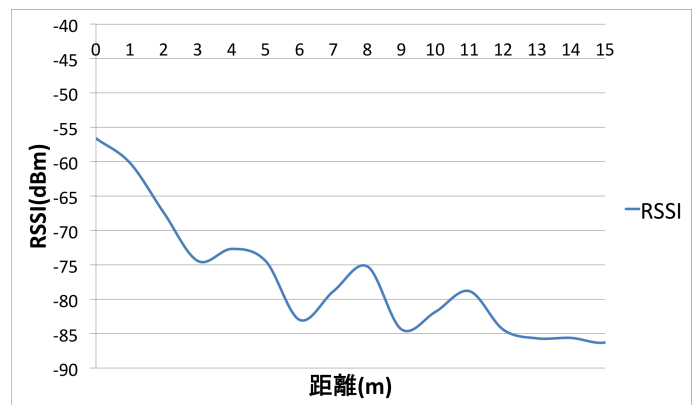


図 6 RSSI 減衰モデル

減衰モデルから、2m から 3m に位置が変わると急激に RSSI 値が減衰し、それ以降はその変動が緩やかであることが読み取れる。したがって設置する距離は 2m ~ 3m、領域判定に使用する RSSI のしきい値に関しては大幅な変動が始まる 2m 付近の RSSI 値である約 -65dBm が望ましいと判断した。

次に、基礎実験として移動パターン 1 のシナリオにそって図4の0番目の受信機から17番目の受信機に向かって直線的に歩いた結果を以下の図7に示す。

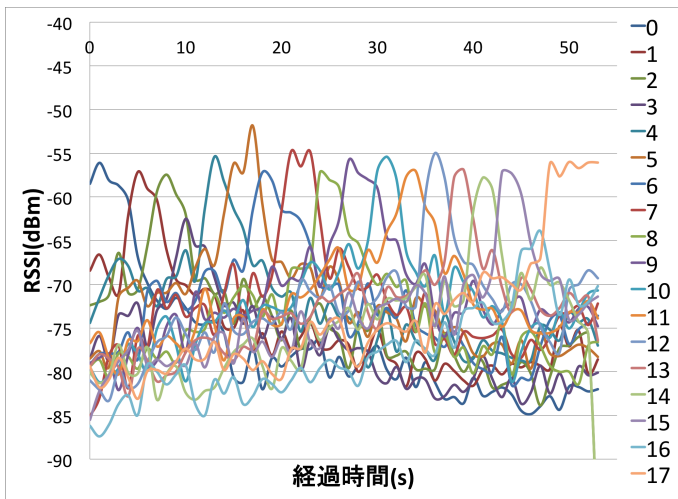


図 7 移動パターン 1 計測結果

図 7 における, 0m, 1m, 2m, ... , 17m は図 4 において赤い丸で示した受信機が置かれている位置を表している. このグラフにおいて, 先ほど減衰モデルから設定した RSSI のしきい値 (-65dBm) より大きな値のみに着目すると, ユーザの移動軌跡を容易に推定することが可能であることがわかる. またこの結果から得られる推定移動軌跡と, 正解データから作成した移動軌跡とを比較した結果が図 8 である.

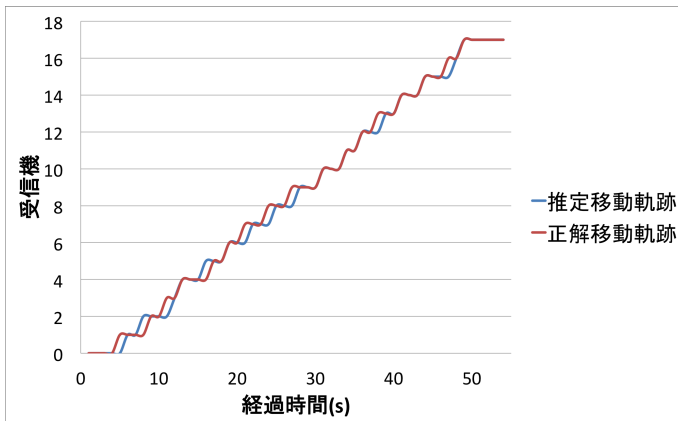


図 8 移動パターン 1 移動軌跡比較

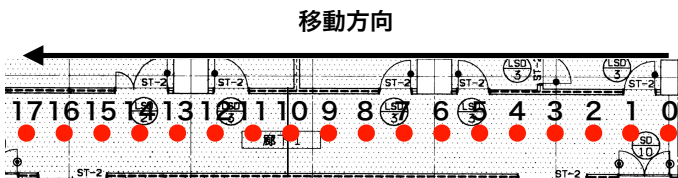


図 9 移動パターン 1 正解移動軌跡

図 8 の縦軸である受信機というのは, 図 4 にて赤い丸で示した受信機の置かれている位置を表している. 移動パターン 1 では図 9 に示すように受信機 0 から受信機 17 に向かって直線的に移動を行ったことより, 図 8 では 1 次関数に近い動きをとっている. 図 7, 図 8 から, 減衰モデルより得られた設置間隔よりも密に受信機を設置している場合

には, 提案システムを利用することで, 高精度な領域推定及び移動軌跡推定を行うことが可能であることが判明した.

次に実環境を考慮した場合の実験として, 移動パターン 2 のシナリオにそって図 5 の中で自由に歩いた結果を, 以下の図 10 に示す.

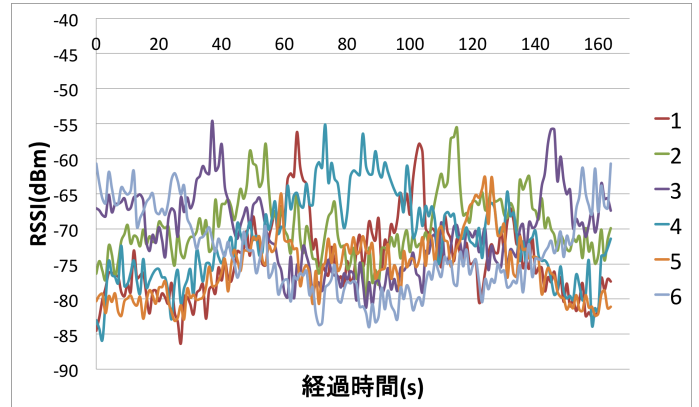


図 10 移動パターン 2 計測結果

図 10 における 1, 2, 3, ... , 6 は図 5 にて赤い丸で示した受信機の置かれている位置を表している. 図 10 においても同様に, RSSI のしきい値 (-65dBm) より大きな値のみに着目することで, ある程度ユーザの移動軌跡を推定することが可能であることがわかる. しかし, 図 7 と比較すると, 識別をするのが難しい点が多々存在していることもわかる. こちらも同様に, 結果から得られる推定移動軌跡と, 正解データから作成した移動軌跡とを比較した. その結果を図 11 に示す.

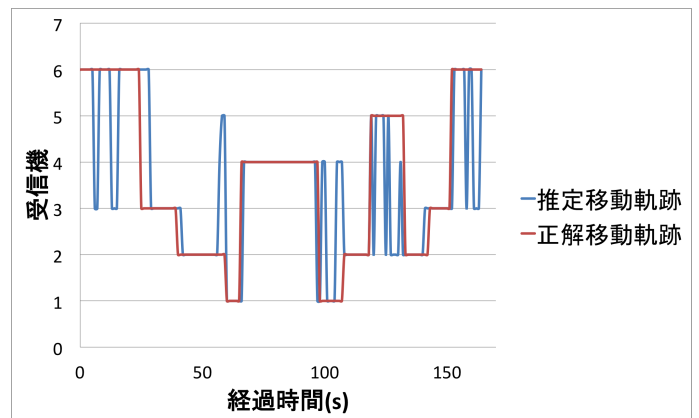


図 11 移動パターン 2 移動軌跡比較

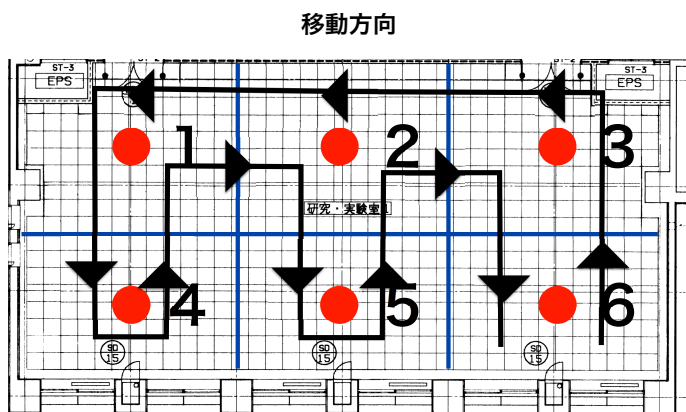


図 12 移動パターン 2 正解移動軌跡

図 11 の縦軸である受信機というのは、図 5 にて赤い丸で示した受信機の置かれている位置を表している。移動パターン 2 では図 12 に示すように様々な受信機を縫うように歩いて行く移動を行った。図 11 を見てわかるように、実環境下において粗く受信機を設置した場合には、各受信機で計測される RSSI 値に差が少なくなることから単純に RSSI 値が一番大きい領域がその時刻において存在している領域であるとみなしてしまうと、移動軌跡にノイズが多く混入してしまう。したがって、これらのノイズを軽減するための手法を検討する必要がある。

6. まとめ

本稿では、病院や老人ホームといった環境下において、複数人の存在領域並びに移動軌跡を、見守り対象者にストレスを感じさせることなく推定するシステムの提案を行った。提案システムの評価として、複数の条件で RSSI 値のみを利用してユーザの存在領域並びに移動軌跡を推定する実験を行ったところ、その有効性を確認することが出来た。今後は、iBeacon だけではなく、開閉センサや感圧センサといったセンサと提案システムを組み合わせることで、実環境下における推定精度の向上を目指していく予定である。

参考文献

- [1] 平成 27 年 5 月報 人口推計 (総務省統計局) <http://www.stat.go.jp/data/jinsui/pdf/201505.pdf>
- [2] 【Interview】日本初の地域見守りサービス、注目の「otta」とは? <http://techable.jp/archives/19718>
- [3] Paul, Anindya S, WAN, Eric A: Rssi-based indoor localization and tracking using sigma-point kalman smoothers, Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of, 2009, 3.5: 860-873.
- [4] A. Ward, A.Jones, and A.Hopper : a new location technique for the active office , IEEE Personal Communications, Vol.4, No.5, pp42-47, 1997
- [5] J.Zhu, L.Haiyong, C.Zili, L.Zhaohui : RSSI Based Bluetooth Low Energy Indoor Positioning, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2014
- [6] 石塚 宏紀, 上坂 大輔, 黒川 茂莉, 渡邊 孝文, 村松 茂樹,

小野 智弘: BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討 Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有. 情報処理学会研究報告. マルチメディア通信と分散処理研究会報告, 2014(21), 1-6.