

Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた IoT 向け屋内測位手法に関する研究 Indoor Positioning Method for Internet of Things

工藤 大希[‡] 堀川 三好[‡] 岡本 東[‡]

Daiki Kudo Mitsuyoshi Horikawa Azuma Okamoto

1. はじめに

近年、様々な分野で IoT (Internet of Things) が注目されている。そのため、製造業や流通業では、移動する人やモノをセンシングするための技術として、屋内測位技術の確立が期待されている。従来の屋内測位技術には、各種センサを利用した自律航法や Wi-Fi/BLE (Bluetooth low Energy) の受信信号強度 (RSSI : Received Signal Strength Indicator) を利用した測位手法が提案されている。これらの技術は歩行者ナビゲーションや動線分析など、様々な領域への導入が進められているが、生産・物流現場への導入には測位精度や導入コストに多くの課題を残している。

著者らの研究グループは、BLE ビーコン (以下、ビーコン) を用いた測位手法 (以下、BLE 測位) に関する研究に取り組んでいる。第 14 回、第 15 回の情報科学技術フォーラムでは、歩行者を対象とした測位手法に関する研究について報告した [1][2]。先行研究は、一般的な通路において平均誤差 3m の測位を実現した。また、駅などの公共交通インフラにおける実証実験を通じ、ナビゲーションとしての有用性を確認している。しかしながら、生産・物流現場を想定した精度検証や実証実験は行われていない。

本研究は、各種センサを搭載したスマートタグと BLE 測位を用いることにより、移動するモノを対象とした IoT の実現を目指している。そのため、本稿では生産・物流現場を移動する人やモノを対象とした屋内測位技術について検討する。すなわち、BLE 測位手法の一つである格子位置推定について、生産・物流現場での利用を想定した検証実験を行う。さらに、検証実験の結果から格子位置推定を IoT 向けの屋内測位技術として拡張するための考察を行う。

2. 屋内測位技術

本章では、IoT 向けの屋内測位技術として利用が期待できる技術を取り上げ、それぞれの特徴と課題を述べる。

2.1 自律航法

測位対象が持つ各種センサを利用し、相対的な位置の変化を推定する自律航法 (DR : Dead Reckoning) が提案されている。DR は車や船、ロボットや人など、多様な対象の測位に用いられる。これらの中でも、歩行者を対象とした DR は歩行者自律航法 (PDR : Pedestrian DR) と呼ばれている。PDR は加速度や地磁気、角速度センサなどを利用して、既知の位置からの相対的な移動を累積的に推定する手法である。測位対象が持つセンサのみを利用するため外部に機器を設置する必要がなく、導入コストを抑えられる利点がある。しかしながら、相対測位であるため誤差が累積する点や測位端末の保持姿勢に精度が依存する点、初期位置が必要となる点など、多くの課題が残されている [3]。

2.2 受信信号強度を利用する測位

測位環境に設置された Wi-Fi アクセスポイント (以下、AP) やビーコンからの RSSI を利用する測位手法が提案されている。RSSI は、送信機と受信機の距離に応じて値が減衰する。距離に応じた RSSI の減衰は、送信機を中心とする球の表面積に反比例するため、理論上の距離を RSSI から算出できる。しかしながら、RSSI の実測値は様々な要因で値が変動する。RSSI と距離の関係について、自由空間での理論値と屋内環境での実測値の例を図 1 に示す。実測値の計測は、測位端末に Nexus5X、ビーコンには BLU250 を利用した。ビーコンと測位端末の距離を 1m ずつ離し、20m までの各地点 1 分間の RSSI を平均値で示している。

2.2.1 三角測量

三角測量は、三つ以上の送信機からの理論上の距離を RSSI から算出することで、円の交点の関係から位置を推定する方法である [4]。実装が容易で、既に設置されている Wi-Fi AP を流用できるなどの利点がある。しかしながら、常時三つ以上の送信機から RSSI を観測する必要があるため、綿密な機器の配置計画が必要である。また、RSSI は人ごみや障害物により値がばらつくため、実環境では測位精度が低下するという課題がある。

2.2.2 フィンガープリンティング

フィンガープリンティング (以下、FP) は、測位環境の各地点で RSSI を事前に計測しておき、実際に観測した RSSI と比較することで位置を推定する手法である。RSSI は、距離による減衰のほかにシャドウイングやマルチパスフェージングによる影響を受けるため、理論値や距離を用いるよりも高精度な測位が可能となる。しかし、RSSI の事前計測は測位環境全域での計測が必要になるため、事前計測の負荷を軽減するための研究が行われている [5]。

2.3 その他の技術

生産・物流現場で利用されている技術として、UWB (Ultra Wide Band) を用いた測位手法が提案されている [6]。UWB は、無線ネットワークである UWB-IR (Impulse Radio) 無線を用いて、電波伝搬時間から位置を推定する技術であ

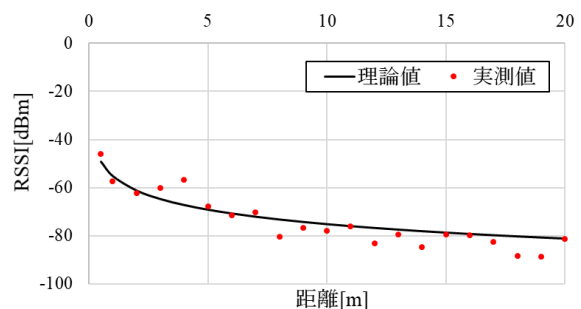


図 1 理論 RSSI と実測 RSSI の距離による減衰

[‡] 岩手県立大学院ソフトウェア情報学研究所

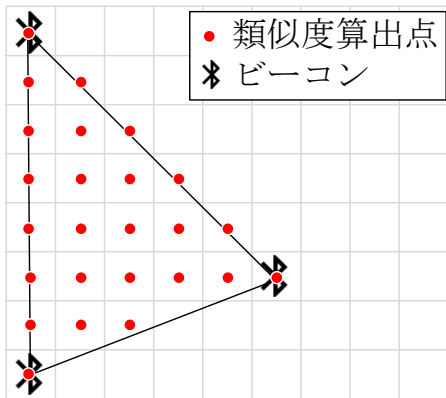


図 2 類似度算出点の設定方法

る。誤差数 cm の測位が可能である一方で、機器の価格や機器の配置にかかるコストが課題となっている。

このように、単一の測位手法には未だ多くの課題が残されているため、複数の屋内測位技術を組み合わせたハイブリッド型の手法が提案されている。例えば、ビーコンを用いた測位と PDR を併用する測位手法が提案されている[7]。ビーコンが設置できない環境や測位が容易な通路で測位を PDR に切り替えることで、測位システムの導入容易性を向上している。また、相互補完型の Wi-Fi/地磁気 FP 手法が提案されている[8]。地磁気 FP は、場所によって異なる値を観測する残留磁気を用いた測位手法である。Wi-Fi FP と地磁気 FP を組み合わせることで、Wi-Fi AP が少なく測位が難しい場所での高精度な測位を実現している。

3. 提案する屋内測位手法

3.1 格子位置推定

格子位置推定は、測位環境に設置した複数ビーコンからの RSSI を用いた測位手法である。FP の計測データを理論値から算出することで、事前計測不要の FP を実現している[9]。そのため、FP よりも測位システムの導入容易性が高い。また、理論値と実測値の比較にコサイン類似度を用いることで、測位端末の機種性能差に低依存な測位を実現している。

3.2 測位手順

手順 1：類似度算出点の設定

電波を観測したビーコン設置座標の内側を測位領域とし、格子状に分割する。そして、分割した各格子の中心座標を類似度算出点とする (図 2)。

手順 2：類似度算出点における理論 RSSI の算出

手順 1 で設定した各類似度算出点における理論上の RSSI をビーコン毎に算出する。ビーコン設置座標は既知であるため、ビーコンから類似度算出点までの距離を求めることで、理論上の RSSI を算出することができる。

手順 3：類似度算出

類似度算出点ごとに、理論上の RSSI を成分とする理論値ベクトルと、実測した RSSI を成分とする実測値ベクトルのコサイン類似度を算出する。そして、コサイン類似度が最大の類似度算出点を現在位置とする。

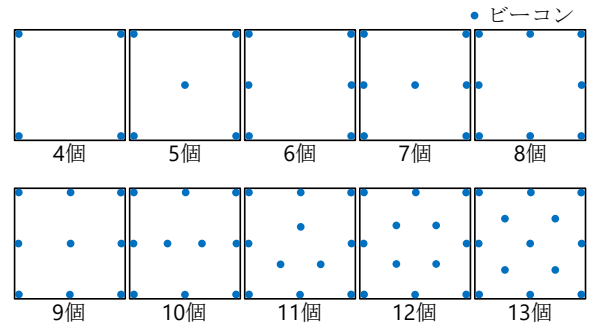


図 3 ビーコン配置

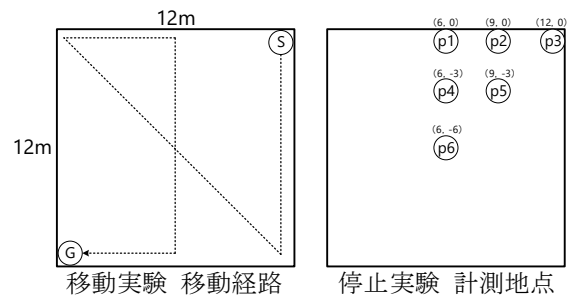


図 4 実験概要

4. 測位精度検証

4.1 実験概要

本章では、格子位置推定が IoT 向けの屋内測位技術として利用できるかを考察するため、検証実験により測位精度を明らかにする。生産・物流現場では、通路以外にも任意の空間で測位を行う必要があるため、障害物や仕切りがなく測位対象が自由に動くことのできる自由空間で実験を行う。格子位置推定は、測位環境やシステムのパラメータが精度に影響することが分かっている。そこで、ビーコンの配置とビーコンの送信出力、測位に用いる RSSI の収集時間を変更した場合の測位精度を算出する。これにより、測位環境やパラメータの調整で、どこまで測位精度を向上できるか明らかにする。

4.2 実験条件

4.2.1 ビーコンの配置方法

格子位置推定は、RSSI が観測可能な全てのビーコンを用いて位置を推定するため、測位環境に存在するビーコンの数や配置によって測位精度が変動する。予備実験から、測位環境に対して均等にビーコンを配置した方が測位精度が良いことが分かっているため、均等な配置でビーコンの個数を 4 個から 13 個まで変更した場合の測位精度を算出する。各個数におけるビーコン配置を図 3 に示す。

4.2.2 ビーコンの送信出力

ビーコンの送信出力は、高出力であるほど電波の到達範囲が広がるため、より多くのビーコンからの RSSI を測位に用いることができる。しかし、送信出力によって消費電流も増減するため、電池での長期稼働を想定する場合には低出力の設定が必要である。つまり、測位精度への影響を加味したうえで、できるだけ低出力の設定が望まれる。本実験では、ビーコンの送信出力を +4, -8, -20dBm に設定した場合の測位精度を算出する。

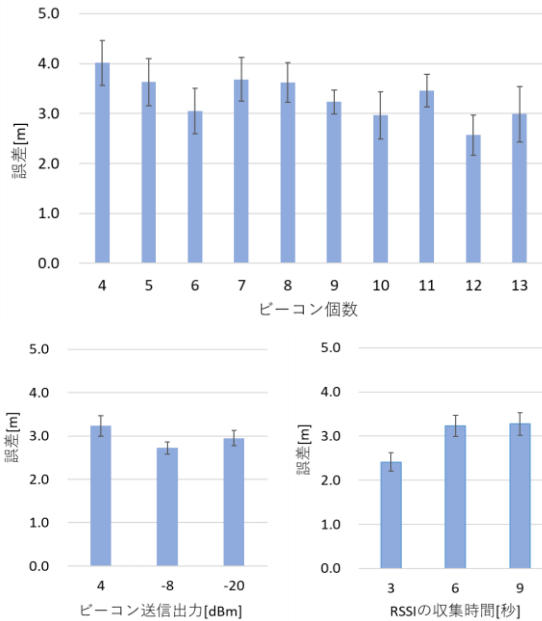


図 5 移動実験結果

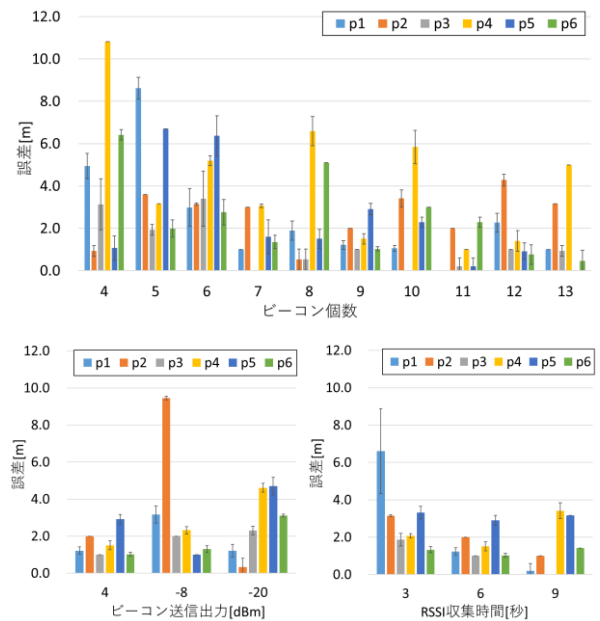


図 6 静止実験結果

4.2.3 測位に用いる RSSI の収集時間

格子位置推定は、一定時間に収集した RSSI の平均値を用いて位置を推定している。RSSI の収集時間は短いほどリアルタイムな値になるが、受信個数が減少するためノイズの影響が大きくなる。本実験では、RSSI の収集時間を 3 秒、6 秒、9 秒に設定した場合の測位精度を算出する。なお、測位の間隔と測位に用いる RSSI の収集時間は別に設定しており、本実験では 2 秒間隔で位置を推定している。

4.3 実験方法

実験は、生産・物流現場における移動中のマテハン機器や人を想定した移動状態の実験と、半製品や製品を想定した静止状態の実験を行う。

(a) 移動状態の実験

図 4 左図に示す経路を秒速 1m で歩行する。地面に目印を設置し、メトロノームと同期して歩行することで、一定速度での移動を実現する。また、測位端末は自身の胸の前に来るように保持して歩行する。測位誤差は、1 秒間隔の測位結果と実際の座標とのユークリッド距離で計算する。

(b) 静止状態の実験

図 4 右図に示す p1 から p6 までの計 6 地点における測位誤差を算出する。測位端末を高さ 1m のダンボールの上に置き、30 秒間の測位結果を記録する。

4.4 実験環境

実験は、岩手県立大学の構内にある 12m×12m の室内で行う。ビーコンは 2.7m の高さにポールを用いて設置する。予備実験から、測位端末の機種性能差による測位精度への影響は小さい事が分かっているため、Nexus5X (Android 7.1.2) の 1 機種で実験を行う。ビーコンは株式会社イーアールアイ製の BLU250-H を用いる。

4.5 実験結果

本節では、各実験における測位誤差と誤差の要因について考察する。移動状態の測位誤差を図 5 に、静止状態の測

位誤差を図 6 に示す。また、誤差が生じた要因を明らかにするために、実験と同様の環境で RSSI を計測する。移動状態で観測された RSSI を図 7 に、p5 地点で 30 秒間静止したときの RSSI を図 8 に示す。RSSI の計測実験は、ビーコン 9 個、ビーコン送信出力 +4dBm、RSSI の収集時間 6 秒の設定で行う。実測値は、ビーコン毎にビーコンの配置とグラフの配置を対応付けて示している。

4.5.1 移動状態の実験結果

ビーコンの個数は、増やすほど測位誤差が小さくなる。RSSI の実測値を見ると、移動時の RSSI は常にばらつきが大きく、特に値が弱いとばらつきが大きくなる傾向が見られる。また、距離が離れているビーコンは比較的理論値よりも強い RSSI を観測しており、誤差の要因となっている。ビーコンの個数を増やすことで、実測値と理論値の差が大きいビーコンの影響を緩和できていると考えられる。

ビーコンの送信出力は、-8dBm のとき最も誤差が小さい。実験はビーコンの配置密度が高い環境であるため、+4dBm では出力が強くなり、ビーコン間における RSSI の差が小さくなるのが要因と考えられる。

RSSI の収集時間は、短いほど誤差が小さくなる。測位に用いる RSSI のリアルタイム性が向上するため、測位の即時性が向上したと考えられる。

4.5.2 静止状態の実験結果

移動状態と同様に、ビーコンの個数を増やすほど測位誤差は小さくなる。また、移動状態よりも静止状態の方が個数による測位精度への影響は顕著に見られた。計測地点によって誤差の傾向が異なっており、計測地点がビーコンの直下になる地点は誤差が小さくなった。静止状態の RSSI は、計測地点とビーコンにより傾向が異なっている。例えば、p5 地点で③ビーコンから観測される RSSI は、ほぼ理論値通りに小さいばらつきで観測できている。しかし、⑤ビーコンから観測される RSSI は、値が -45、-50、-65 の三層に綺麗に分かれている。電波の送受信チャンネルを特定できるビーコンで検証したところ、これらは受信端末のチャ

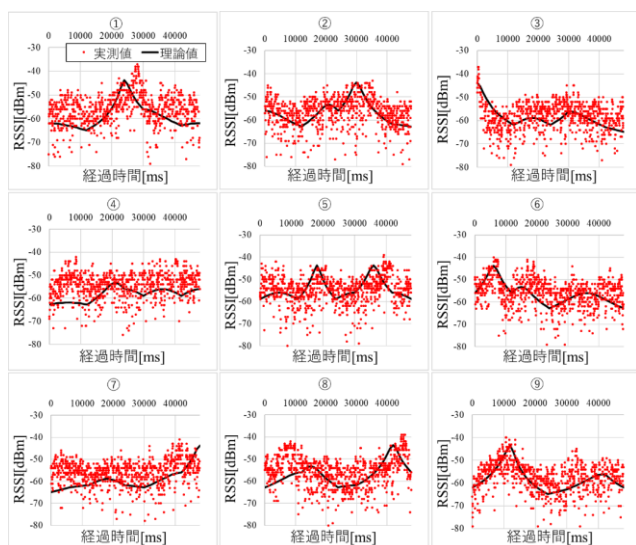


図 7 各ビーコンにおける移動状態の RSSI

ネルによる影響であることが明らかになった。受信端末は、非常に短い間隔で 37ch, 38ch, 39ch の 3 チャンネルを切り替えて電波を受信している。周波数帯の違いによりマルチパスフェージングの影響が異なるため、チャンネルによって RSSI が変動したと考えられる。また、比較的 RSSI が弱いチャンネルほど、値がばらつく傾向がみられた。

ビーコンの送信出力は、値が強いほど誤差が小さくなる。RSSI が弱いと値はばらつきやすくなるため、誤差が大きくなったと考えられる。

RSSI の収集時間については、長く設定するほど誤差が小さくなる。電波の受信チャンネルによる RSSI のばらつきが、緩和できていることが要因と考えられる。

5. BLE ビーコンを用いた IoT 向け測位手法の考察

静止状態では、測位環境やパラメータ設定により平均誤差 2m の測位を実現した。しかしながら、測位領域に多量のビーコンを設置する必要があるため、導入コストの増加が懸念される。少ないビーコン個数でも平均誤差 2m を実現できるように、測位手法を見直す必要がある。移動状態では、測位環境やパラメータを調整しても平均誤差 2.5m である。移動状態ではマルチパスフェージングの影響が位置により変動し RSSI が安定しないため、精度向上は難しいことが分かる。IoT 向けの測位では、動線の把握や現品管理に誤差 2m 以内の測位が必要と考えているため、格子位置推定の精度向上が必要である。

静止状態と移動状態で測位精度や RSSI の傾向に違いがみられたため、それぞれの状態を分けて測位手法を拡張し、格子位置推定の精度向上を図る。静止状態では、実測値と理論値の差が大きくノイズとなるビーコンを測位に利用しないことで、高精度化が期待できる。また、RSSI が弱い受信チャンネルは測位に利用しないなど、マルチパスフェージングによる影響の緩和についても検討を進める。移動状態については、他のセンサとの併用を検討する。格子位置推定は絶対位置を推定できるため、高精度な相対測位である DR との併用が考えられる。絶対測位と相対測位を組み合わせることで、相互に欠点を補完し合う高精度測位の実現を目指す。

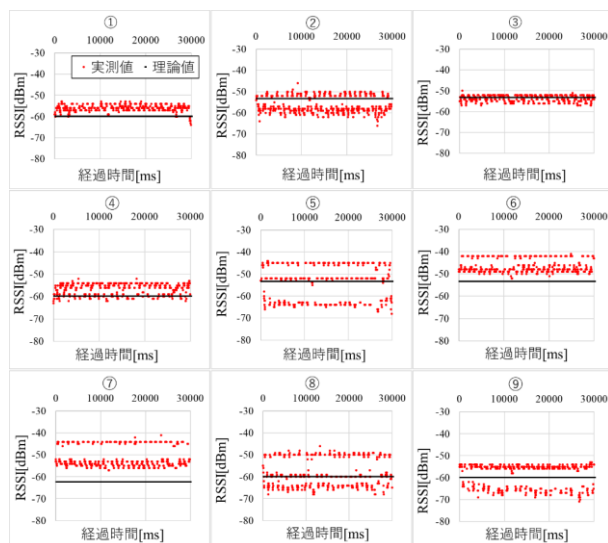


図 8 各ビーコンの静止状態の RSSI (p5 地点)

6. おわりに

本稿では、様々な環境における格子位置推定の精度検証を行い、誤差や誤差の要因について考察した。また、格子位置推定を IoT 向けに利用するための考察を行った。ビーコンを用いた屋内測位技術は製造業や物流業においてイノベーションを起こす可能性があるが、多くの課題も残されている。今後は、測位手法の提案や評価、生産・物流現場での実証実験を通じ、より実用的な測位手法の実現を目指す。

参考文献

- [1] 古館 達也, 堀川 三好, 工藤 大希, 岡本 東, "Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた屋内測位手法に関する研究", 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.14, No.4, pp.312-313 (2015).
- [2] 古館 達也, 堀川 三好, 工藤 大希, 岡本 東, "Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた歩行者測位手法の提案", 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.15, No.4, pp.249-250 (2016).
- [3] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之. 手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 558-570, (2011).
- [4] 北須賀輝明, 中西恒夫, 福田晃. 無線通信網を用いた屋内向け測位方式. 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS), Vol. 44, No. SIG10(ACS2), pp. 131-140, (2003).
- [5] 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完手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1609-1618, (2013).
- [6] Gezici, S., Tian, Z., Giannakis, G.B., et al. "Localization via Ultra-Wideband Radios: a look at positioning aspects for future sensor networks", IEEE Signal Processing Magazine, Vol.22 No.4, pp70-84(2005)
- [7] 工藤 大希, 堀川 三好, 古館 達也, 岡本 東, "BLE 測位および PDR を用いたハイブリッド型屋内測位手法の提案", 第 79 回全国大会講演論文集, Vol.2017, No.1, pp.3-325-33-326 (2017).
- [8] 東 和樹, 新井 イスマイル, "相互補完型 Wi-Fi・地磁気フィンガープリンティング手法の提案", "情報処理学会論文誌", Vol.58, No.2, pp384-395, (2017)
- [9] 古館 達也, 堀川 三好, 工藤 大希, 岡本 東, "Bluetooth Low Energy の通信特性を考慮した測位システムに関する研究", 第 79 回全国大会講演論文集, Vol.2017, No.1, pp.3-29-33-30 (2017).