

高信頼測位範囲最大化に基づく 屋内測位向け BLE ビーコン配置最適化

大橋 弘一郎^{1,a)} 野村 篤史^{1,b)} 下坂 正倫^{1,c)}

概要: BLE を用いた屋内測位では GPS が正常に働かない部屋内や地下で位置の予測が可能であり、Wi-Fi と異なりビーコンの設置や移動が容易なことから屋内測位を行う環境に適した配置が可能である。BLE のビーコンを用いた屋内測位では測位精度がビーコンの配置に依存しているため、ビーコンの配置を最適化する必要がある。ビーコン配置を最適化する手法の 1 つに、3 つの BLE ビーコンから得られる電波強度がある値以上の範囲のを最大化する手法がある。しかし、3 つの BLE ビーコン電波が届く範囲であれば測位誤差が低いわけではない。事前の屋内測位のシミュレーションにより得られた測位誤差が低いエリアを高信頼測位エリアと定義し、高信頼測位エリアを最大化する配置を提案する。この手法を用いることで屋内測位の測位誤差が低いエリアが最大となる配置を得ることができる。3 つの BLE ビーコンの電波が届く範囲を最大化する配置と提案手法で得られた配置で測位誤差が低い範囲の面積を比較し、提案手法の有用性を示す。

1. 序論

GPS が正常に働かない室内や地下での位置測定は様々なサービスに利用可能なため注目されている。屋内測位の手法の一つとして、屋内にすでに導入されている Wi-Fi の電波を利用し、測位対象者の端末が得る電波の強度により位置測定を行う手法が多く提案されている。この手法では屋内測位のために追加で機器を設置しなくて良いという利点があるが、Wi-Fi のアクセスポイントの移動が困難なためアクセスポイントの位置が偏っている場合などに対応できない。そのため、屋内測位を行う環境に適した配置により測位精度の向上が望める BLE(Bluetooth Low Energy) ビーコンによる屋内測位が盛んに研究されている。

BLE ビーコンを用いた屋内測位では測位精度がビーコンの配置に依存しているため、ビーコンの配置を最適化する必要がある。ビーコン配置最適化手法には 3 つのビーコンの電波が届く範囲を広げることで配置を決定する手法 [1][2][3] や地図情報と人間の経験と知識を用いて配置を決定する手法 [4] がある。

これらの手法では 3 つの電波が届く範囲を屋内測位が可能な範囲だと仮定しており、3 つの電波届く範囲を拡大することを目指している。しかし、3 つの電波が届く範囲で

あっても測位精度が悪い範囲は存在するため、単純に 3 つの電波届く範囲を拡大することで屋内測位に適した配置が得られるわけではないと考えられる。

そこで、本研究では高信頼測位範囲を用いたビーコン配置手法を提案する。高信頼測位範囲とは屋内測位の測位誤差が小さいエリアのことで、高信頼測位範囲を最大化する配置を求めることで広い範囲で測位誤差が小さくなるビーコン配置を実現する。本研究では使用したビーコン数に対し、高信頼測位範囲が全体の何割を占めるかを提案手法と既存手法で比較し、高信頼測位範囲を用いた配置最適化の有用性を示す。

本研究の貢献は以下である。

- 事前の屋内測位のシミュレーションにより得られた測位誤差が低いエリアを高信頼測位範囲と定義し、高信頼測位範囲を最大化する配置を提案した。
- 既存手法による配置と提案手法による配置を、使用したビーコン数や測位誤差が低い範囲などから評価した。

関連研究

3 つのビーコンからの電波強度に基づく配置最適化

屋内測位のためのビーコン配置として 3 つのビーコンの電波に基づく配置手法が多く提案されている。Falque らは、3 つのビーコンから電波が届く範囲とビーコン間の距離を最大化することでビーコン配置を決定する手法を提案した [1]。この論文では 3 つのビーコンから電波が届く範

¹ 東京工業大学

a) ohashi@miubiq.cs.titech.ac.jp

b) nomura@miubiq.cs.titech.ac.jp

c) simosaka@miubiq.cs.titech.ac.jp

囲を広げるだけでなく、ビーコン間距離を広げることでより広い範囲で屋内測位が可能な配置を提案した。Zhangらは、3つのビーコンから電波が届く範囲とビーコン間の距離を最大化し、ビーコン数を最小とする配置を提案した [2]。この論文ではビーコン配置最適化で課題となるビーコン数の削減に注目し、目的関数にビーコン数を組み込むことでビーコン配置を決定する手法を提案した。Rajagopalらは地図情報から3つのビーコンから電波が届く範囲を最大とする配置を決定する手法を提案した [3]。また、この論文では地図情報を用いることで2つのビーコンでも測位が可能な範囲があることも示した。

これらの論文では3つの電波が届く範囲を屋内測位が可能な範囲だと仮定しており、実際に屋内測位を行った際の測位誤差などを用いずに配置を決定しているため、屋内測位に適した配置を得られているかは不明である。

地図情報と事前知識に基づくビーコン配置

Upadhyayらは、地図情報と事前に屋内測位において重要だと考えられている地点に基づくビーコン配置手法を提案した [4]。この論文では曲がり角などの測位に重要だと経験的にわかっている点で強い電波が得られるようなビーコン配置を求めている。

しかし、この方法では特殊な知識が必要になってしまうため、誰でもビーコン配置を決定できないことを考えると導入のコストが高いと考えられる。また、曲がり角などの位置が正確にわかるような地図情報が必須となる。建物によっては正確な地図情報を得ることが困難な可能性も考えられるため、地図が必須という点においても容易に実世界に導入できる手法ではない。

2. 電波強度に基づく配置最適化

2.1 ビーコン配置最適化の問題設計

ビーコン配置最適化では屋内測位に使用するビーコンの配置を決定する。屋内測位の対象となる範囲の任意の位置で精度良く測位をできることが目標となるが、配置の決定の際に問題となるのがビーコン数の削減である。任意の位置で精度良く測位をできることへの単純な解決策は大量にビーコンをばら撒くことである。大量のビーコンを用いれば任意の位置で複数のビーコンの電波が届くという状況を容易に実現できるため、任意の位置での精度の良い測位が可能である。しかし、この大量にばら撒くという方法では設置と維持のコストが膨大になる。測位対象の範囲が広ければビーコンを配置するのにかかる時間は大きく、また、ビーコンは電池で稼働しているため、屋内測位のシステムを維持するだけで大量の電池を消費し管理のコストも発生する。このことから、ビーコン配置最適化では可能な限り少数のビーコンで広範囲の屋内測位が精度良く行えるような配置が解決すべき問題となる。ビーコン数が少数とな

ると測位対象の範囲で複数のビーコンの電波が届くという状況を実現することは容易ではない。そのため、この問題を解決する手法が多く提案されており、解決するための手法の一つについて、次の節 2.2 で詳しく説明する。

2.2 3つのビーコンからの電波強度に基づく配置最適化の概要と課題

3つのビーコンからの電波強度に基づく配置最適化手法では3つのビーコンからある値以上の電波が届く範囲とビーコン間の距離を同時に最大化することにより少数で広範囲で精度の良い測位が可能なビーコン配置を提案する。3つのビーコンからの電波強度に基づく手法の1つである Falque らの手法 [1] では、測位対象の範囲が $X \times Y$ m² であったとすると、追加のビーコンの決定に使用する目的関数は式 1 で表される。

$$f = \frac{1}{3XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \min(c(x, y), 3) + \lambda \sum_{i=1}^n \min_{b_j \in \{B/b_i\}} \|b_i - b_j\|. \quad (1)$$

ただし、 $b_i \in B$ はすでに配置したビーコンを表し、 B は全ビーコンの集合である。 λ はビーコンの拡散を調整するパラメータであり、 $c(x, y)$ は式 2 で定義される電波が届いているかを判定する関数である。

$$c(x, y) = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{if } \text{RSSI}_i(x, y) > -100\text{dBm} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2)$$

$\text{RSSI}_i(x, y)$ は (x, y) での電波強度を示しており、 n は配置したビーコン数である。式 1 が最大となる配置をグリーディサーチで選択し逐次的にビーコン配置を決定する。

しかし、この手法は配置の決定の際に屋内測位の測位精度を考慮していないという問題がある。式 1, 2 から、3つのビーコンからの電波強度が-100dBm より大きい範囲を最大化する問題としてビーコン配置最適化を捉えているとわかるが、3つのビーコンの電波が届くから測位精度が良いとは限らない。電波強度を用いた屋内測位では測位に最低でも3つのビーコンが必要なことがわかっているが、3つのビーコンからの電波が届くことは精度良く屋内測位ができることの必要条件であるだけで十分条件ではない。つまり、屋内測位の測位誤差を用いたビーコン配置が必要だと考えられる。

3. 高信頼測位範囲に基づくビーコン配置最適化

3.1 提案手法の概要

本研究では高信頼測位範囲に基づくビーコンの初期配置の決定と測位誤差に基づく追加のビーコン位置の決定の2

段階によりビーコン配置を決定する。初期配置の決定と追加のビーコンの決定の両方に屋内測位のシミュレーションで得られた測位誤差を用いることで屋内測位に適したビーコン配置を目指す。1段階目のビーコンの初期配置の決定では、初期配置として3つのビーコンを正三角形の頂点の位置に配置することを考え、その際にビーコン間の距離を高信頼測位範囲から決定する。2段階目の追加のビーコン位置の決定では、高信頼測位範囲と測位誤差に基づく損失関数からグリーディサーチで逐次的にビーコンを配置する。詳細な方法については節3.3で説明を行う。

3.2 高信頼測位範囲と目的関数の定義

高信頼測位範囲とは屋内測位における測位誤差が5m未満の範囲と定義する。本研究ではこの高信頼測位範囲を最大化することで屋内測位に適したビーコン配置を目指す。測位対象の範囲が $X \times Y$ m²であったとすると、追加のビーコンの決定に使用する損失関数は式3で表される。

$$f_{\text{loss}}(x, y, p) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y f_{\text{ST}}(x, y, p). \quad (3)$$

この関数は位置 (x, y) のソフト閾値を用いた損失を計算する関数で、式4で定義される。

$$f_{\text{ST}}(x, y, p) = \begin{cases} 0 & f_{\text{indoor}}(x, y) < p \\ f_{\text{indoor}}(x, y) - p & f_{\text{indoor}}(x, y) \geq p \end{cases}. \quad (4)$$

f_{indoor} は位置を引数として測位を行った際の距離の誤差を返す関数である。つまり、ある地点 (x, y) の測位誤差が p 未満であれば損失は0で、 p 以上であれば測位誤差から p を引いた値を損失とする。

また、他の目的関数として、ハード閾値を用いた目的関数である式5もグリーディサーチに使用する。

$$f_{\text{cost}}(x, y, p) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y f_{\text{HT}}(x, y, p). \quad (5)$$

ハード閾値については、式6で計算を行う。

$$f_{\text{HT}}(x, y, p) = \begin{cases} 1 & f_{\text{indoor}}(x, y) < p \\ 0 & f_{\text{indoor}}(x, y) \geq p \end{cases}. \quad (6)$$

f_{HT} は高信頼測位範囲の面積を計算する関数である。

3.3 ビーコン配置最適化

3.3.1 高信頼測位範囲に基づくビーコンの初期配置の決定

電波強度を用いた屋内測位では各ビーコンから得られた電波の強度からビーコンと測位対象の端末との距離を推定し位置の予測を行う。この際に位置を一意に決定するため

には最低でも3つのビーコンからの電波が必要となる。しかし、単に3つの電波が届くのみでは高精度で屋内測位を行うことはできないため、シミュレーションにより屋内測位を行って得た高信頼測位範囲を基にビーコンの初期配置を決定する。そのため、本研究ではビーコンを正三角形の頂点にあたる位置に配置し、初期配置とする。

初めに3つビーコンを置いた際に各グリッドで得られる電波強度を予測する。この電波強度の予測には電波伝搬式を用いる方法やpylayers[5]などのシミュレーションを用いる方法などがあるが、本研究では実際に収集したBLEの電波強度のデータを使用する。BLEの電波強度は距離により減衰することが知られているため、ビーコンからの距離が0mから15mまで、50cm刻みで収集した電波強度により各グリッドの電波強度を予測する。次に、予測した電波強度と位置の情報を学習データとし、コスト考慮型ヒンジ損失を用いた多層のニューラルネットワークにより屋内測位モデルを作成する。最後に、作成した屋内測位モデルでテストを行い、得られた各グリッドの測位誤差から高信頼測位範囲を求める。ここでビーコン間の距離が問題となる。ビーコン間距離が変化することで測位対象のグリッドに届く電波強度やその分散が変化するため各グリッドの測位精度に影響を及ぼす。そのため適切なビーコン間距離の決定が必要である。最適なビーコン間距離は、候補となるそれぞれのビーコン間距離に対し測位対象の全範囲中で高信頼測位範囲が何割を占めるかで決定する。

3.3.2 追加のビーコン位置の決定

本研究では追加のビーコンの候補地点を1辺が4mの正三角形のグリッド上とした。追加のビーコンの決定にはグリーディサーチを用いる。 $k-1$ 個のビーコンがすでに配置されている状況で k 個目のビーコンの配置を決定するためには、候補地点にビーコンを配置したと仮定し、初期配置の決定と同様に電波強度の予測と屋内測位モデルの作成とテストを行う。ここで、各候補点に対して評価を行う際に、2種類の方針を提案する。1つ目は式3を用いた決定方法である。各候補地点ごとに式3の損失を計算し、この損失が最も小さい候補点を次にビーコンを置くべき地点だと決定する。2つ目は式5を用いた決定方法である。各地点ごとに式6を用いて高信頼範囲を計算し、測位対象の全範囲中で高信頼範囲の占める割合が最大の候補点を次にビーコンを置くべき地点だと決定する。

4. 性能評価

本実験は実世界の建物と同じ大きさの空間にビーコンを配置し、 1×1 m²のグリッドごとに屋内測位を行った測位誤差を用いて配置の評価を行う。今回は図1に示す、東京工業大学にある建物にビーコンを配置することを想定し、 15×46 m²の壁などが存在しない空間を評価に使用した。

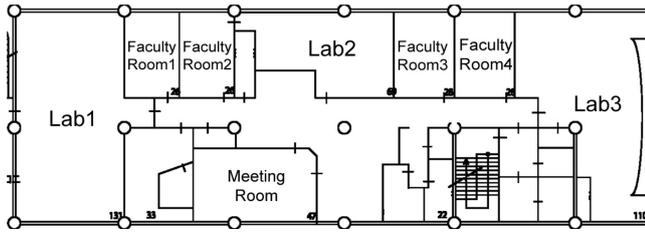


図 1: 測位対象範囲の地図

4.1 高信頼測位範囲に基づくビーコンの初期配置の検証

初期配置として正三角形となるようにビーコンを配置する。その際の適切なビーコン間距離を得るためにビーコン間距離を 2m から 14m まで変化させ、それぞれのビーコン間距離で高信頼区間の割合がどのように変化するか確認する。図 2 に各ビーコン間距離の配置の性能の比較を示す。

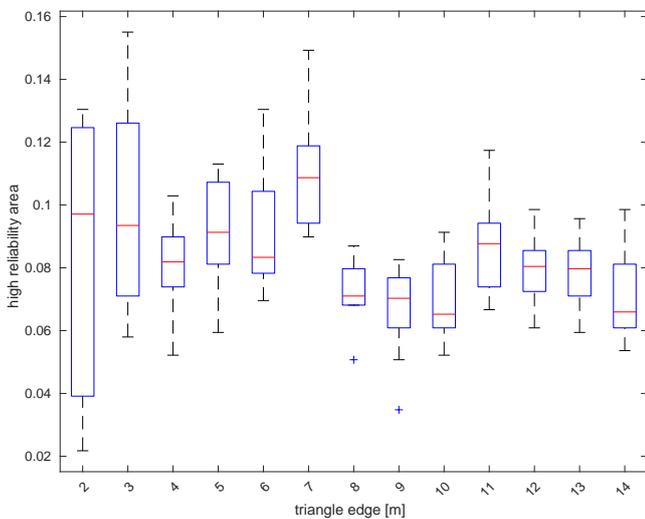


図 2: ビーコン間距離による性能の比較

今回は各ビーコン間距離で 10 回屋内測位を行い、高信頼測位範囲の割合を計算し、その結果を箱ひげ図で表現した。横軸は正三角形に配置した際のビーコン間距離を縦軸は高信頼測位範囲の割合を示している。図 2 からビーコン間距離が 7m の時に中央値が最大となることがわかる。次に、図 3 - 5 にビーコン距離が 2m, 7m, 14m の際の測位誤差のヒートマップを示す。カラーマップの単位は [m] である。各図の赤い点はビーコンの設置位置を示す。各グリッドの面積は $1 \times 1m^2$ で、そのグリッドを予測した際の測位誤差を色で示している。また、電波が 3 つ以上届かない範囲は測位ができないため、ランダムな位置を予測するようにしている。図 2 から中央値が最大となる 7m を本実験では採用する。

4.2 グリーディサーチを用いたビーコン配置の検証

次に、ビーコンを既存手法と提案手法で配置した際の性能を評価する。本実験では使用するビーコン数を 3 個から 25 個に変化させた際の高信頼測位範囲の割合から性能を確

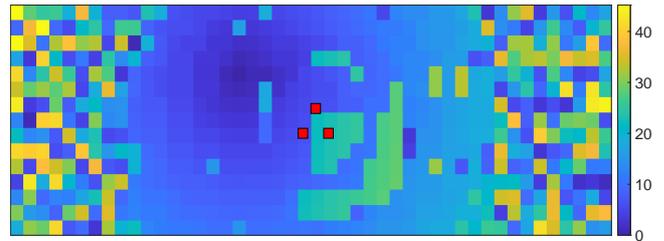


図 3: ビーコン間距離 2m の測位誤差のヒートマップ

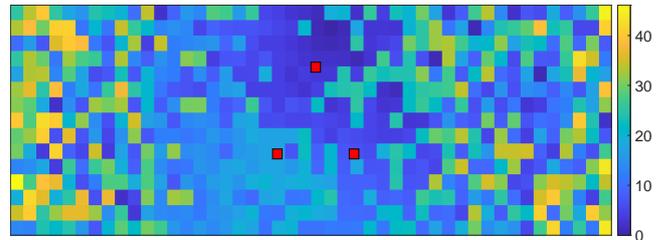


図 4: ビーコン間距離 7m の測位誤差のヒートマップ

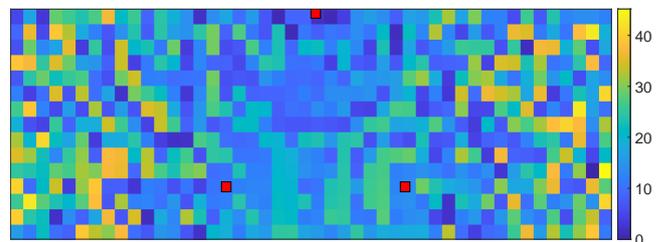


図 5: ビーコン間距離 14m の測位誤差のヒートマップ

認する。

4.2.1 パラメータの変化によるビーコン配置の検証

式 4 で導入したパラメータ p の変化によるビーコン配置の性能について評価する。本実験では $p = 3, 5, 7, 10$ をパラメータ p の候補とし、それぞれのパラメータでビーコンを 3-25 個配置した際の高信頼測位範囲の割合から適切なパラメータ p を決定する。図 6 に損失関数のパラメータを変化させた際の高信頼測位範囲の比較を示す。

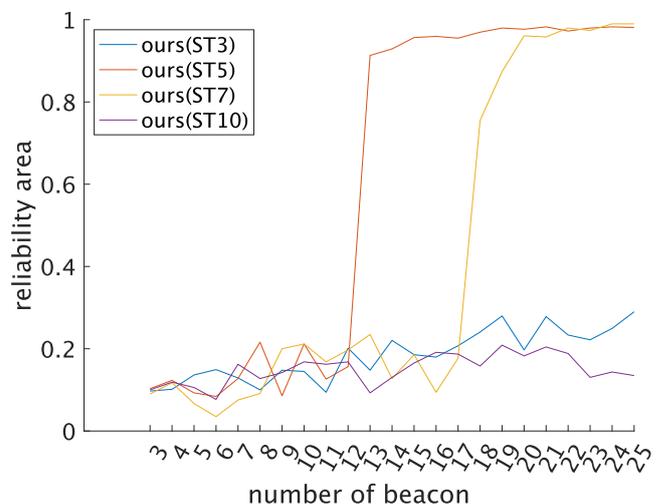


図 6: ST のパラメータによる高信頼測位範囲の比較

横軸は使用したビーコン数を縦軸は高信頼測位範囲の割合を示す。ビーコンを 25 個使用した際には $p = 5$ のときに最も少数のビーコンで高信頼測位範囲の割合が 0.9 を達成した。

図 7 に式 4 で導入したパラメータ p を 5 とした際の損失の比較を示す。

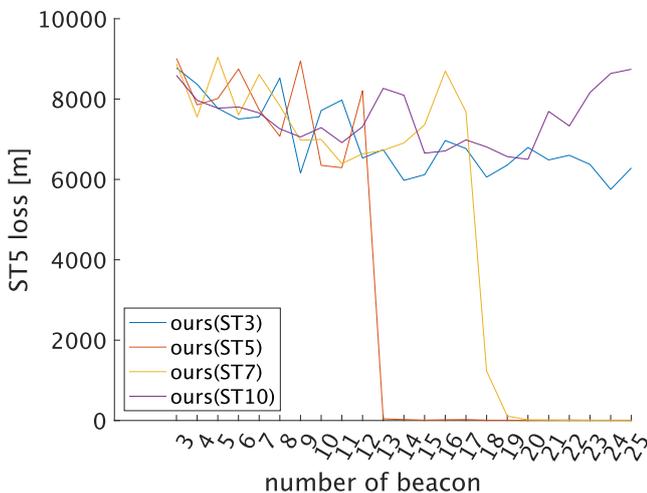


図 7: ST のパラメータによる損失の比較

ビーコンを 25 個使用した際に最も少数のビーコンで損失が小さくなるのは p を 5 とした際であったため、本実験では式 4 のパラメータ p は 5 が最適な値と考え、既存手法との比較に使用する。

同様に式 6 の最適なパラメータも考える。図 8 に目的関数のパラメータを変化させた際の高信頼測位範囲の比較を示す。

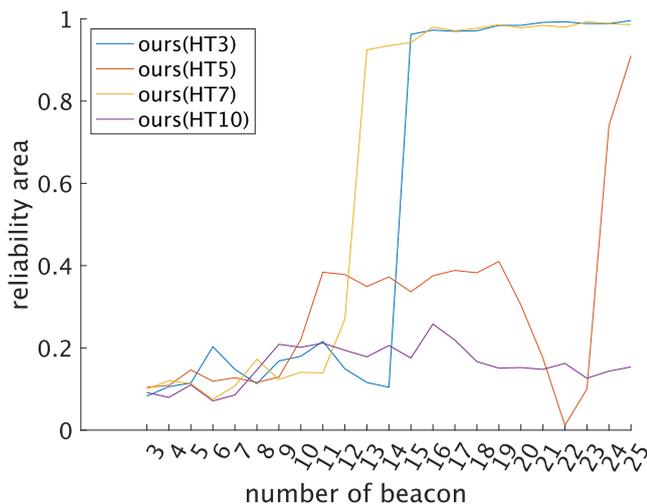


図 8: HT のパラメータによる高信頼測位範囲の比較

ビーコンを 25 個使用した際には $p = 7$ のときに最も少数のビーコンで高信頼測位範囲の割合が 0.9 を達成した。図 9 に式 4 で導入したパラメータ p を 5 とした際の損失の比較を示す。

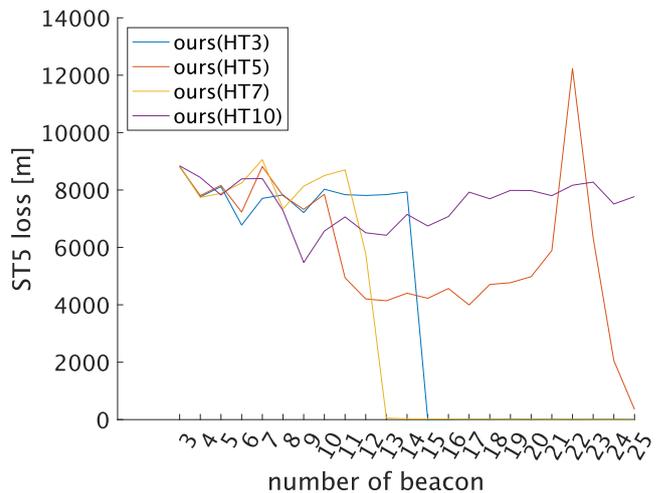


図 9: HT のパラメータによる損失の比較

ビーコンを 25 個使用した際に最も少数のビーコンで損失が小さくなるのは p を 7 とした際であったため、本実験では式 4 のパラメータ p は 7 が最適な値と考え、既存手法との比較に使用する。また、ハード閾値とソフト閾値のパラメータの比較から閾値として 10 を使用することは適切でないことがわかった。

4.2.2 既存手法と提案手法のビーコン配置の検証

次に既存手法と提案手法のビーコン配置の性能の評価を行う。図 10 に高信頼測位範囲の比較結果を示す。

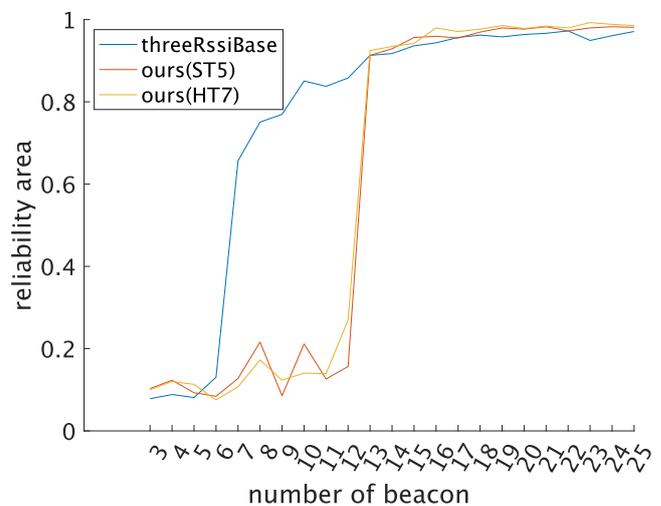


図 10: 既存手法と提案手法の高信頼測位範囲の比較

今回は既存手法、高信頼測位範囲を最大化する手法、式 3 の損失関数を最小化する手法の 3 つ配置の性能を比較する。ビーコンを 25 個使用した際の高信頼測位範囲の割合は、比較手法による配置が最も少数のビーコンで 0.8 を達成することがわかった。また、どの手法を用いる場合でもビーコンを 13 個以上使用する際の高信頼測位範囲の割合に差は見られなかった。

各手法で実際に得られたビーコンの配置による測位誤差のヒートマップを図 11-13 に示す。各図の赤点はビーコン

の配置を示している。

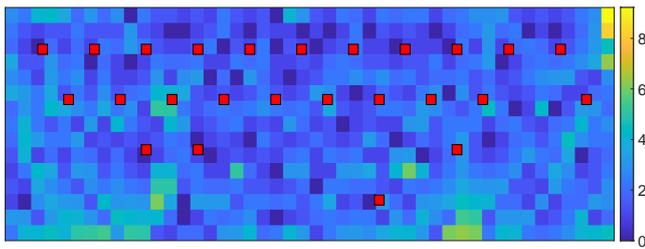


図 11: 既存手法の配置

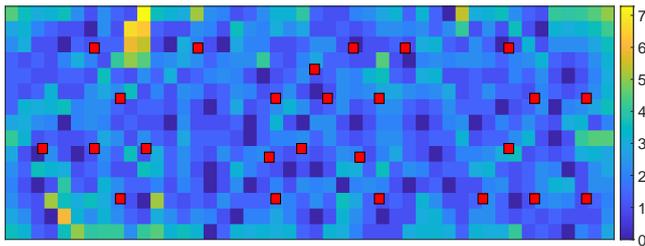


図 12: ヒンジ損失ベースによる配置

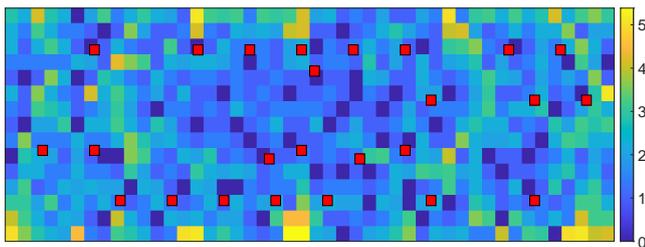


図 13: 高信頼測位範囲ベースによる配置

図 11 を見ると測位対象範囲の上部にビーコンが集中していることがわかる。一方、図 12, 13 を見ると測位対象範囲の全体にビーコンが配置されている。これらのビーコン配置から提案手法による配置最適化ではビーコンの偏りのない配置が提案可能であることがわかる。

5. 結論

本研究では高信頼測位範囲に基づくビーコン配置最適化手法の提案を行い、得られた配置の性能の評価を行った。実験結果より、単に電波強度を用いてビーコンの配置を決定する手法と比べ、測位対象範囲を偏りなく配置することが可能であることが示された。しかし、最も少数のビーコンで高信頼測位範囲の割合が 0.8 を達成した配置は既存手法であったため、現状の提案手法では配置するビーコン数が少数の際に高信頼測位範囲が広い配置を提案できていないこともわかった。

本研究の将来課題として、ビーコンを配置する候補となるグリッドを細かくした際の精度の評価が挙げられる。また、本研究では壁による電波の減衰を考慮していないため、

配置後に壁の影響を考慮してビーコン位置の微修正を行う必要などがあり、これらについて取り組む必要がある。

参考文献

- [1] R. Falque, M. P. and Biehl, J.: Optimizing Placement and Number of RF Beacons to Achieve Better Indoor Localization, *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, QLD, Australia, pp. 2304–2311 (online), DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460202 (2018).
- [2] Zhang, C., Yankov, D., Shapiro, S. and Wu, W.: An End-to-end Beacon Placement Optimization System for Indoor Positioning, *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/IPIN51156.2021.9662619 (2021).
- [3] Rajagopal, N., Chayapathy, S., Sinopoli, B. and Rowe, A.: Beacon placement for range-based indoor localization, *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/IPIN.2016.7743626 (2016).
- [4] V. Upadhyay, K. R. and Balakrishnan, M.: Beacon Placement and Signal Strength Estimation to Improve Localization Coverage and Accuracy, Beijing, China, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/IPIN54987.2022.9918130 (2022).
- [5] Amiot, N., Laaraiedh, M. and Uguen, B.: PyLayers: An open source dynamic simulator for indoor propagation and localization, *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pp. 84–88 (online), DOI: 10.1109/ICCW.2013.6649206 (2013).