

単位 RSSI 値の強弱の推定による位置推定精度の向上

Improvement of Positioning Accuracy by Estimating Unit RSSI

中井 若菜¹ 川濱 悠¹ 勝間 亮¹
Wakana Nakai Yu Kawahama Ryo Katsuma

概要

位置情報を利用したサービスが多数提案されている中で、屋内の位置推定の精度の向上が課題となっている。本研究では、Bluetooth に代表される近距離通信のための電波の受信信号強度情報 (RSSI:Received Signal Strength Indicator) をもとに行った位置推定の精度を向上させる手法について提案する。4 つ以上のアンカノードが存在する環境下で、3 つのアンカノードから従来方式で位置推定を行った後、その位置推定結果を用いて位置推定に用いていない残りのアンカノードの位置推定を行い、アンカノードの推定結果と設置座標のズレから電波強度に補正をかけることにより、自己位置の推定精度を向上させる。実空間における実験で、本手法を、アンカノードが 4 つ設置してある空間に適用した結果、位置推定誤差を軽減できることを確認した。

1. はじめに

近年、GPS を搭載したスマートフォン端末が普及し、位置情報を活用した様々なアプリケーションの開発により、位置情報サービスが注目を集めている。GPS では、GPS が搭載されている機器が衛星からの電波を受信し、衛星の位置と電波の発信時刻から、自己位置を推定することができる。しかし、GPS では衛星の電波が届く範囲に限られているため、地下やトンネル、建物の内部などでは利用できないことが欠点である。そのため、スマートホーム等の屋内のユーザの位置に応じて適切なサービスを提供するシステムでは、屋内で使える位置推定の手法が求められている [1]。

その欠点を補うことのできる位置推定手法として、電波通信による受信信号強度情報 (RSSI) をもとに行う位置推定手法がある。RSSI の値は受信した電波の電力を対数で表すものであり、RSSI の大きさからノード間距離を計算できることが知られている [2]。この従来方式では、絶対座標が既知であるアンカノードを一定数配置し、他のノードはアンカノードの RSSI の値から、そのアンカノードまでの距離を測定し、自己位置の推定を行う。このとき、あらかじめ測定された 1[m] での RSSI 値 (以降、単位 RSSI 値と呼ぶ) をもとに距離を推定する。理論的には 3 つ以上の RSSI が計測できれば測位が可能である。最近の建物には無線アクセスポイントが固定位置に設置されていることが多く、それらにあらかじめ位置情報をインプットしておくことは可能である。そのような環境下であれば、特別な機器を新たに設置することなく位置推定が可能となる。しかし、Bluetooth などの近

距離向け通信では障害物による電波の減衰が厳しい。そのため、障害物の多い場所では、電波の減衰により単位 RSSI 値に大きな変動が生じることによりノード間の距離測定の精度が下がり、位置推定の精度が低くなることが問題視されている。

本研究では、障害物の存在する環境で、RSSI を用いたノードの位置推定の誤差を低減させるために、単位 RSSI 値の補正を行う位置推定手法を提案する。提案手法では、最初に従来の位置推定手法から位置が未知であるノードの位置推定を行う。さらに、その位置推定結果から残りのアンカノードの位置推定を行い、アンカノードの推定結果と設置座標のズレから電波強度に補正をかけることにより、ノード間における単位 RSSI 値を求めることができる。取得した単位 RSSI 値から再度位置推定を行い、これをすべてのアンカノードに対して繰り返し適用し、位置推定座標を収束させることにより、位置推定の精度を向上させる。

本手法は、屋内などの障害物がある空間を対象にできることが特徴であり、現地での RSSI 減衰定数を事前に計測する必要がない。また、各ノード間における単位 RSSI 値を取得することができ、他のノードに対しても既に求めた単位 RSSI 値を使うことで収束を早めることができる。さらに、本論文では RSSI をもとに行った位置推定の精度の向上を目的としているが、RSSI による位置推定に限らず、赤外線による位置推定手法など、さまざまな位置推定手法に適用できることもメリットの 1 つである。本手法で実機実験を行った結果、従来の単位 RSSI 値の補正をしない位置推定の場合の平均誤差は 4.53m、誤差補正を行い再度位置推定を行った場合の平均誤差は 0.829m であり、提案手法では推定誤差を 83% 改善する

¹ 大阪府立大学, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka
599-8531, Japan

ことができた。

2. 関連研究

現在、各ノードの位置を自律的に推定する数々の手法が考案されている。これらの手法は、レンジフリー (Range-free) 方式とレンジベース (Range-based) 方式の2種類に大別できる。

レンジフリー方式は、ノード同士がお互いの距離を測定することなく位置を推定する方式である [3]。本研究ではレンジフリー方式ではなく、次に述べるレンジベース方式を対象とする。

レンジベース方式は、ノード同士の距離や角度を計測し、それらをもとに自己位置を推定する方式である。実際に計測するため、計測手段によってはコストが大きくなるが、より精密な位置推定が可能である。無線 LAN を用いてノード間距離を測定し、ノード位置の位置推定を行う手法が存在する [4][5][6]。これらの方式は近距離用の通信規格である Bluetooth を利用しており、ノード間距離を大きくとることが出来ないが、位置推定の精度がレンジフリー方式に比べて良い。RSSI 値からノード間距離を求めるには、受信した無線電波の受信強度からノード間距離を計測することが必要である。このとき、障害物により著しく RSSI 値が減衰すると、位置推定精度が極端に下がることが問題となっている。

本論文では、障害物が存在する領域において、位置推定の精度を改善する手法について述べる。

3. RSSI による位置推定手法

RSSI とは、主に無線 LAN や Bluetooth などの無線通信において、送信側ノードから送信された信号が、受信側ノードで受信された際に信号の強度がどの程度の大きさになっているかを 1mW を基準として対数で表すものである。RSSI の単位は dBm であり、ほとんどの場合において受信電力は 1mW を下回るため RSSI は負の値になる。

3.1 ノード間距離計測による位置推定

無線機器のアンテナから電波が全方位に均等に放出される場合、距離 D [m] だけ離れた位置での電波の電力密度は、 D を半径とする球の表面積に反比例することが知られている。よって電波の送信電力が P [mW] のとき、距離 D [m] における電波強度 P_D [mW/m²] は式 (1) で表せる。

$$P_D = \frac{P}{4\pi D^2} \quad (1)$$

RSSI は 1mW を基準とする対数で受信電力 P_D の大きさを表す。式 (1) を RSSI 形式にすると式 (2) となる。

$$\begin{aligned} RSSI &= 10 \log_{10} \left(\frac{P}{4\pi D^2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{P}{4\pi} \right) - 10 \log_{10} (D^2) \quad (2) \end{aligned}$$

送信機からの距離 1[m] での RSSI の値を $RSSI_0$ とするとき、式 (2) で $D = 1$ とすると $RSSI_0 = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{4\pi} \right)$ となることに注意すると、式 (2) から式 (3) が得られる。

$$\begin{aligned} RSSI &= RSSI_0 - 10 \log_{10} (D^2) \\ &= RSSI_0 - 20 \log_{10} (D) \quad (3) \end{aligned}$$

式 (3) が示す通り、あるノードから送出された電波は距離に伴い減衰するため、RSSI 値は距離と負の相関関係がある。従って、RSSI 値を計測することにより距離を概算することが可能である。式 (3) の右辺に存在する 20 という定数は理論値であり、実際には場所により異なる値となることが知られているため、これを RSSI 減衰定数 N とおき、式 (3) を変形すると以下の式 (4) が得られる。

$$D = 10^{-\frac{RSSI - RSSI_0}{N}} \quad (4)$$

D : 距離 (m)

$RSSI$: 計測した RSSI 値 (dBm)

$RSSI_0$: 単位 RSSI 値 (dBm)

N : RSSI 減衰定数 (理想的には 20)

RSSI より距離情報を算出する際は式 (4) に従って計算を行う。なお、RSSI 減衰定数 N は場所ごとに適した値を用いる必要がある。

同様に式 (1) を $RSSI_0$ 形式にすると式 (5) になる。

$$RSSI_0 = RSSI + 20 \log_{10} (D) \quad (5)$$

3つ以上のアンカノードの電波が受信可能である場合、それぞれの RSSI に基づき距離を計算することで自己位置を推定することが可能である。3つのアンカノード a_1 , a_2 , a_3 の電波を受信し、それぞれの RSSI の値より求めた距離を r_1 , r_2 , r_3 とするとき、推定座標 s は、 s から各アンカノードまでの距離と RSSI により求めた距離 r_1 , r_2 , r_3 との誤差の2乗和が最小となるように決定する。図1は、3つのアンカノード a_1 , a_2 , a_3 の電波の RSSI を求めて位置推定を行う場合の概念図である。しかし、ノード間に障害物がある場合、電波が減衰し、計測する RSSI 値に誤差が生じるため、距離 r_1 , r_2 , r_3 に誤差が出やすく、推定座標 s にも誤差が生じる。そこで、位置推定を行ったノードからアンカノードの位置推定を行い、単位 RSSI を補正することで、位置推定誤差を低減する手法を4章で提案する。

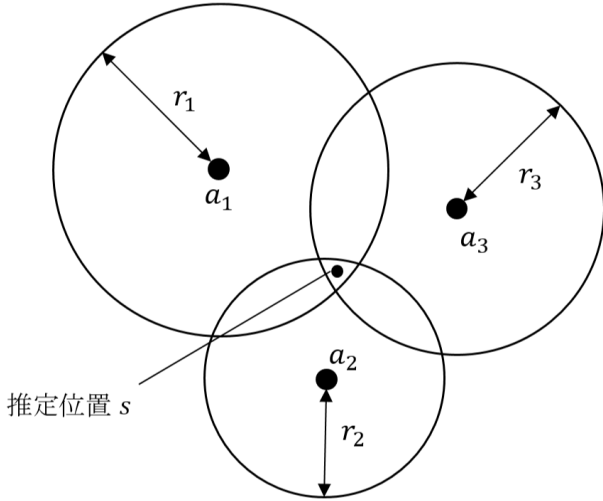


図 1: RSSI による位置推定概念図

4. 単位 RSSI 値補正による位置推定手法

本章では、従来の RSSI による位置推定手法での誤差を低減するために、単位 RSSI 値の補正による位置推定手法を提案する。RSSI を計測することでノード間距離を推定する従来手法に加え、その位置推定結果を用いて位置推定に用いていない残りのアンカノードの位置推定を行い、アンカノードの推定結果と設置座標のズレから電波強度に補正をかけることにより、自己位置推定の精度向上を図る。RSSI による位置推定は障害物がある場合や、人混みなどで電波の減衰が生じてしまうため、ノード間距離の誤差が大きくなりやすい。それに対し、提案手法では特別な機器を追加搭載することなく、アルゴリズムで単位 RSSI 値の補正を行うだけで誤差の補正を行うことができる。

4.1 想定環境

表 1 は本論文で用いるすべての記号と意味の対応表である。

表 1: 記号の対応表

記号	意味
$RSSI_0$	単位 RSSI 値
N	RSSI 減衰定数
a_1, a_2, a_3, \dots	アンカノード
s	位置推定ノード
(x_s, y_s)	位置推定ノード s の 2 次元座標
t_1, t_2, t_3, \dots	位置推定ノード s とアンカノード a_1, a_2, a_3, \dots との間の補正後の単位 RSSI 値

本章で提案する位置推定手法は、ノードは RSSI 計測

機能を持つ通信機器を有するものとし、位置推定を行う必要のあるノード (以降位置推定ノードと表記) および初期状態で位置情報が既知であるアンカノードの 2 種類のノードで構成される。また、設置後はノードの移動が発生せず、設置座標が既知のアンカノードを 4 つ設置する。位置推定ノードと 1 つのアンカノード間に障害物が存在し、RSSI 値が不安定である。

4.2 問題設定

ある位置推定ノード s が位置推定を行う上で用いる情報は次のとおりである。

- s と直接通信可能な位置に存在する各アンカノード (a_1, a_2, a_3, \dots) の設置座標
- 事前に計測された単位 RSSI 値
- RSSI 減衰定数 N
- s により計測される、各アンカノードより到来する電波の RSSI 値

このうち、各アンカノードの設置座標、単位 RSSI 値および RSSI 減衰定数は初期状態で既知とする。各アンカノード電波の RSSI 値は、通信電波を用いて取得する。本問題で最終的に求めるものは以下のとおりである。

- 位置推定ノード s の 2 次元座標情報 (x_s, y_s)
- 位置推定ノード s と各アンカノード間の補正単位 RSSI 値 (t_1, t_2, t_3, \dots)

4.3 提案手法

本節では、4.2 節で説明した問題を解決する手法を述べる。位置推定ノード s は各アンカノードに対して電波通信を行い、取得した RSSI 値から各アンカノードとの距離を式 (4) より推定する。得られたノード間距離から従来手法での位置推定を行い、位置推定ノード s の推定 2 次元座標 (x_s, y_s) を得る。ここで、各アンカノードごとに誤差補正アルゴリズム (4.3.1 節で説明) により、アンカノードの位置推定を行い、本来の設置座標とのズレから位置推定ノードとアンカノード間の単位 RSSI 値を補正する。これを各アンカノードで順番に実行し、位置推定ノード s の 2 次元座標が収束するまで繰り返し行う。位置推定ノード s の補正された 2 次元座標と、位置推定ノード s と各アンカノード間の補正単位 RSSI 値を取得することができる。

4.3.1 誤差補正アルゴリズム

このアルゴリズムは、初めに位置推定ノード s がアンカノード a_2, a_3, a_4 により位置推定された時点で、位置

推定ノード s が実行し、各アンカノードとの単位 RSSI 値を補正する。また、ノード s と通信可能なアンカノードは $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$ とする。

位置推定ノードが実行する誤差補正アルゴリズムの詳細は以下の通りである。ただし、 $\text{mod}(a, b)$ は a を b で割った余りを意味する。

1. $n = 1$ とする。
2. アンカノード $a_{\text{mod}(n+1, m)+1}, a_{\text{mod}(n+2, m)+1}$ と位置推定ノード s よりアンカノード a_n の位置推定を行い、推定座標を得る。
3. a_n の設置座標とステップ (2) で取得した a_n の位置推定座標の誤差の 2 乗和を算出する。
4. ステップ (3) で算出した誤差 2 乗和が閾値 α を超えた場合、ステップ (5) を実行。そうでなければ、ステップ (7) へ。
5. 位置推定ノード s とアンカノード a_n 間の距離 r_n をさまざまな値 (4.3.2 節で説明) でステップ (2) を実行し、 a_n の位置推定結果座標と a_n の設置座標の誤差の 2 乗が最小となるようなノード間距離 r_n を定める。
6. ステップ (5) で定めたノード間距離 r_n から、式 (5) よりそのノード間の単位 RSSI 値 t_n を算出する。また、補正された単位 RSSI 値 t_n を用いて、アンカノード $a_n, a_{\text{mod}(n+1, m)+1}, a_{\text{mod}(n+2, m)+1}$ から再度位置推定ノード s の位置推定を行う。
7. $n = n + 1$ とする。 $n \leq m$ ならステップ (2) へ。そうでなければアルゴリズム終了。

4.3.2 2 乗誤差最小座標の探索

本節では、4.3.1 節の誤差補正アルゴリズムのステップ (5) において、アンカノードの位置推定結果座標と設置座標の誤差の 2 乗が最小となるよう、位置推定ノードの座標を定める方法について述べる。ある動点 $P(x, y)$ を対象空間の端から順番に動かし、それらのうち、アンカノードの位置推定結果と設置座標の誤差の 2 乗が最小となる点 $P_{\min}(x_{\min}, y_{\min})$ を定め、点 P_{\min} の座標とアンカノードの設置座標から、位置推定ノード s とアンカノード間の距離の補正值 r_n を式 (6) より取得する。アンカノードの設置座標を (x_a, y_a) とする。

$$r_n = \sqrt{(x_{\min} - x_a)^2 + (y_{\min} - y_a)^2} \quad (6)$$

4.3.3 アルゴリズムの動作例

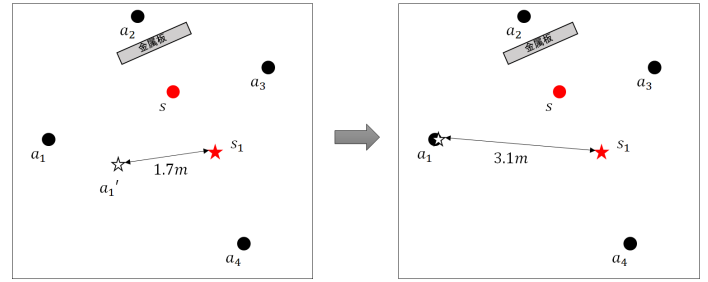


図 2: アルゴリズムの動作例

ここでは、4.3.1 節で説明した誤差補正アルゴリズム動作例を示す。図 2 のようにアンカノードが a_1 から a_4 まで存在し、それらから位置推定ノード s の位置を推定する。ここで、 a_2 と s 間に障害物が存在し、RSSI 値の誤差が大きくなっているものとする。最初に a_1, a_2, a_3 から s の位置推定を行った結果が s_1 である。誤差補正アルゴリズムを $n = 1$ で実行させたとき、ステップ (2) より a_1 の位置推定結果が a'_1 になる。ステップ (3)、ステップ (4) でこの位置推定結果の誤差が大きいかを判断し、大きい場合、ステップ (5) で a'_1 と a_1 ができるだけ重なるようにノード間距離 r_1 を補正する。最後にステップ (6) で s の位置推定を再度行い、 $n = 1$ での動作を終了する。この動作を $n = 1$ から $n = 4$ まで繰り返し、 s の座標が収束するまで繰り返し行う。

5. 精度検証実験

提案手法を用いた位置推定の精度を評価するために実験を行った。最初に、単位 RSSI 値を補正するための位置推定ノード s_1 を設置し、次に、補正した RSSI 値を用いて位置推定を行うための位置推定ノード s_2 を設置して、RSSI の計測を行った。位置が既知であるアンカノードと位置推定ノードからなる屋内空間を 2 種類構築した。

5.1 対象空間と使用機器

実験の対象空間として、 $2.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ の屋内空間 (A) と、 $3\text{m} \times 3\text{m}$ の屋内空間 (B) を設定し、それぞれアンカノード 4 つ、位置推定ノードを 1 つ配置した。ノードの配置座標は図 3、図 4 の通りである。

また、実験用端末として Nexus 9 を 3 台、Xperia を 2 台使用し、電波強度の測定のアプリケーションとして Beacon Simulator を用いた。

5.2 実験手順

前節で示した対象空間を屋内に展開、設置した。 $a_1 \sim a_4$ の 4ヶ所に設置したアンカノードは、いずれもタブ

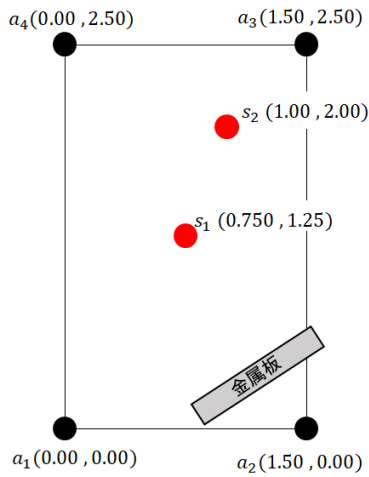


図 3: 対象空間 (A)

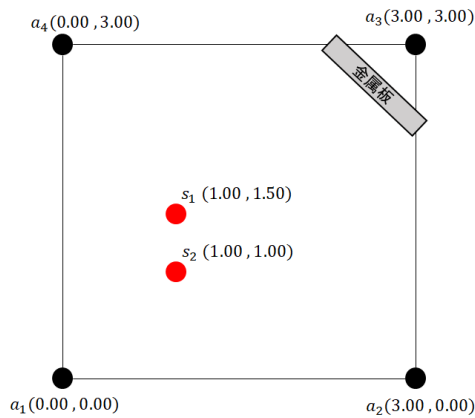


図 4: 対象空間 (B)

レットの上面がフィールドの中央を向くように設置方向を統一し、設置後は常時ビーコン信号の送信を行った。また、実験では、電波の減衰が著しく発生した際に誤差が低減できるかを確認するため、図 3、図 4 のようにアンカノードと位置推定ノード s の間に金属板を立て、電波の減衰が起きるようにした。位置推定ノードは受信電波の RSSI 計測において指向性を持つため [7]、RSSI 計測の際は、計測する電波を送信するアンカノードの方向を向くように設置し、20 回分の RSSI データを計測した。計測した 20 個分のデータは第 1 五分位数から第 4 五分位数までの平均値をとり、RSSI の計測値とした。得られたデータを基に、提案手法を用いて位置推定及び単位 RSSI 値の補正を行った。RSSI データより距離を計算する際、単位 RSSI 値は予備実験より求めた値である -61.5 を用いた。また、RSSI 減衰定数は理論値である 20 を用いた。

5.3 実験結果

表 2 は、本実験において、対象空間 (A) および対象空間 (B) の 4ヶ所のアンカノードで計測された RSSI の値である。

表 2: RSSI 計測値

	対象空間 (A)	対象空間 (B)
a_1	-61.1	-63.1
a_2	-78.9	-72.7
a_3	-61.9	-90.1
a_4	-63.3	-67.1

取得した RSSI データを用いて、従来手法で位置推定を行った後、提案手法を用いて誤差の補正を行った結果を図 5、図 6 に示す。従来手法での位置推定の平均誤差は 4.53m となり、提案手法での平均誤差は 0.829m となった。

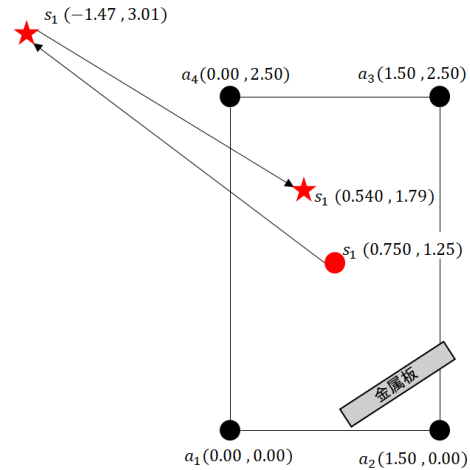


図 5: 対象空間 (A) の補正結果

また、位置推定ノード s との単位 RSSI 値を補正した結果を表 3 に示す。

表 3: 単位 RSSI 値の補正值

	対象空間 (A)	対象空間 (B)
a_1	-48.6	-41.9
a_2	-64.8	-58.0
a_3	-58.4	-77.7
a_4	-65.4	-50.2

次に、補正した単位 RSSI 値を用いて図 3、図 4 の位置推定ノード s の位置推定を行った結果を図 7、図 8 に示す。

提案手法により、従来手法に比べて平均誤差は 83% 低減することができた。しかし、補正した単位 RSSI 値を

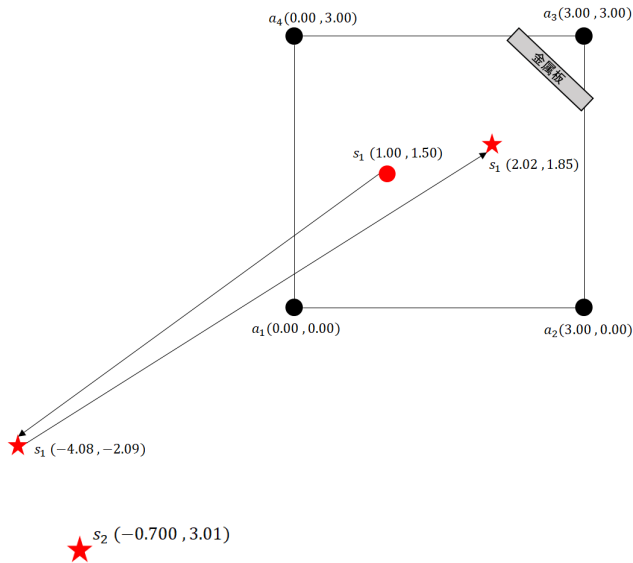


図 7: 対象空間 (A) の位置推定結果

用いて他の位置推定ノードの位置推定ノードの位置推定を行うと、誤差が大きくなってしまった。提案手法では誤差の補正が行われたが、まだ誤差が残っているため、補正単位 RSSI 値も誤差を含んでしまっていることが大きく影響していると考えられる。

5.4 実験結果の評価

障害物が存在している環境においては、提案手法は従来手法との比較で平均誤差を 83% 低減する結果が得られ、現地での RSSI 減衰定数の事前計測や、追加の特別な機器を必要とせず、高精度な位置推定が可能であったことがわかる。一方で、まだ単位 RSSI 値の補正精度が低いため、補正単位 RSSI 値を用いた他のノードの位置推定は誤差が大きくなった。

6. まとめ

本稿では、4つのアンカノードを配置し、3つのアンカノードから従来方式で位置推定を行った後、その位置

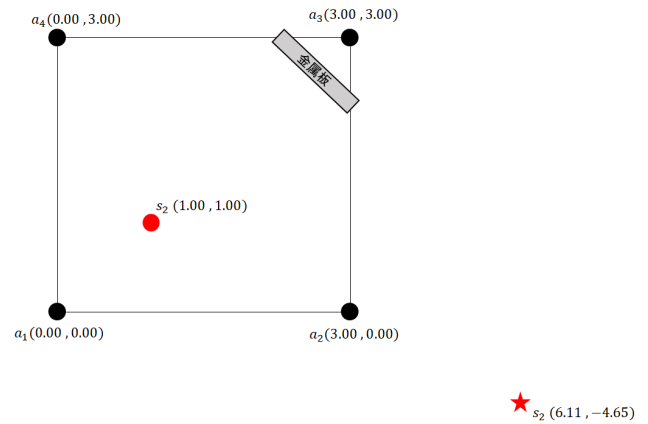


図 8: 対象空間 (B) の位置推定結果

推定結果を用いて位置推定に用いていない残りのアンカノードの位置推定を行い、アンカノードの推定結果と設置座標のズレから電波強度に補正をかけることにより、自己位置の推定精度を向上させる手法を提案した。また、実際に障害物が存在する屋内空間を構築し、評価実験を行った結果、提案手法での位置推定の平均誤差は 0,829m となり、従来手法と比較して 83% 誤差を低減できた。しかし、取得した補正単位 RSSI 値から他のノードを位置推定したところ、誤差がかなり大きくなってしまった。今後は単位 RSSI 値の補正の精度の向上を目的として、他のノードの位置推定も行っていきたい。

参考文献

- [1] 上田健揮, 玉井森彦, 安本慶一: “スマートホームにおける複数のセンシングデータに基づいた生活行動データ抽出システムの提案”. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集 pp.1884–1891, (2014).
- [2] 酒井瑞樹, 森田裕之: “Bluetooth を用いた屋内位置推定手法の提案”. 経営情報学会 全国研究発表大会要旨集 (2016).
- [3] HongYang Chen, Kaoru Sezaki, Ping Deng, and Hing Cheung So: “An Improved DV-hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks.” *Proc. of the 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2008)*, pp. 1557–1561, (2008).
- [4] 伊藤誠悟: “3次元距離センサと無線 LAN を用いた屋内位置推定”. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集 pp.1792–1799, (2014).

- [5] Yapeng Wang, Xu Yang, Yutian Zhao, Yue Liu, Laurie Cuthbert: "Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods," *Proc. of IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 2013.
- [6] Mohamed Er Rida, Fuqiang Liu, Yassine Jadi, Amgad Ali Abdullah Algawhari, Ahmed Askourih: "Indoor Location Position Based on Bluetooth Signal Strength," *Proc. of IEEE Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 2015.
- [7] 川濱悠, 勝間亮: "WMSNにおけるRSSIとカメラを併用した位置推定手法". 第24回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.50-58, (2016).