

Bluetooth Low Energy ビーコンによる屋内測位のための 測距精度向上

岡本東^{†1} 堀川三好^{†1}

概要: 電波を用いた屋内測位において、受信信号強度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) による複数地点からの測距結果に基づいた多点測位は、最も基本的なアイデアである。しかし、一般に、この方法で十分な精度が得られないことが知られている。この主な原因として、マルチパスフェージングやシャドウイングなどが挙げられる。また、これらの他に Bluetooth Low Energy (BLE) のアドバタイジングを利用する場合、一定周期での受信信号強度の変化が観測される。本研究では、BLE のアドバタイジングの特徴を利用して、信号強度を用いた測距の精度向上を行う手法を提案する。具体的には、用いられる3つのチャンネルの周波数の違いを利用して送受信機間の距離を算出する。

キーワード: 受信信号強度, 測距, Bluetooth Low Energy (BLE)

Improving Distance Measurement Accuracy for Indoor Positioning using Bluetooth Low Energy Beacon

AZUMA OKAMOTO^{†1} MITSUYOSHI HORIKAWA^{†1}

Abstract: In indoor positioning using radio waves, the multipoint positioning based on distance measurement result using Received Signal Strength Indicator (RSSI) from multiple points is the most basic idea. However, it is generally known that the position accuracy by this method is insufficient due to multipath fading and shadowing. Additionally, periodic changes in RSSI are observed when using Bluetooth Low Energy (BLE) advertising messages. In this research, we propose an improvement method of distance measurement accuracy using signal intensity by using BLE advertising characteristics. In particular, the distance between beacon and receiver is calculated from the frequency difference between three channels used for the advertising messages.

Keywords: Received Signal Strength Indicator (RSSI), distance measurement, Bluetooth Low Energy (BLE)

1. はじめに

電波を用いた屋内測位において、受信信号強度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) による複数地点からの測距結果に基づいた多点測位は、最も基本的なアイデアである。正確な測距が可能であれば、平面上の測位は三点測位で可能である。しかし、一般に、この方法で十分な精度が得られないことが知られている。この主な原因として、マルチパスフェージングやシャドウイングなどが挙げられる。

一方、これらの現象による問題に対して、様々な地点で予め測定しておいた値 (フィンガープリント) を記録しておき、測位時に実測値と比較する手法 (フィンガープリンティング) がある。しかし、事前のフィンガープリント作成のコストが高いことや、環境の変化によってフィンガープリントの再作成が必要になるなどの問題がある。

また、Bluetooth Low Energy (BLE) のアドバタイジングを発信する専用デバイスである BLE ビーコンを測距に利用することによる、安価な測位システムが提案されている。しかし、BLE ビーコンからの受信信号強度は、静止した状

態であっても時間による周期的な変化が観測される。

歩行者ナビゲーションなど、動が前提の用途であれば、時系列で前後の情報を利用して補正することが有効であるが、工場内の物品の測位など、動き続けるとは限らない場合の測位などには、このような手法は利用しにくく、測距精度の向上が求められる。

本研究では、BLE のアドバタイジングの特徴を利用して、信号強度を用いた測距精度向上を行う手法を提案する。また、この手法に基づいて理論値および実測値を用いた数値実験を行う。

2. BLE ビーコンの概略

送信機として用いる BLE ビーコンは、BLE のアドバタイジング (具体的には Non-Connectable and Non-Scannable Undirected Event [2]) の送信のみを行うデバイスである。一般的な用途として、特定のエリアに関連するサービスを利用できるようにするために、予め固有 ID をエリアに紐づけ、それをパケットに含めて送信するビーコンを設置する。このような BLE ビーコンの製品は、2012 年から存在している [3]。また、2013 年に Apple がロケーション技術として iBeacon [4] を発表したことによって注目されるようになった。iBeacon は、BLE における ADV_NONCONN_IND PDU

^{†1} 岩手県立大学
Iwate Prefectural University

(Protocol Data Unit) のペイロード内で利用できる最大31オクテットのデータ領域 (AdvData) のフォーマットを規定したものである (図 1)。同様のものとして Google の Eddystone [5]などがある。

BLE は 2010 年 6 月に改訂された Bluetooth 4.0 で追加されたもので、それ以前からある Bluetooth と同様に 2.4GHz 帯を用いるが、利用方法は大幅に異なっている。BLE はその名の通り、規格のねらいとして省電力があり、さらにビーコンは単一の機能に特化することによって、ボタン電池 1 個で 1 年～数年の動作が可能になっている製品もある。ただし、消費電力や電池の寿命は出力 (送信電力) の大きさやパケット送信間隔に依存する。

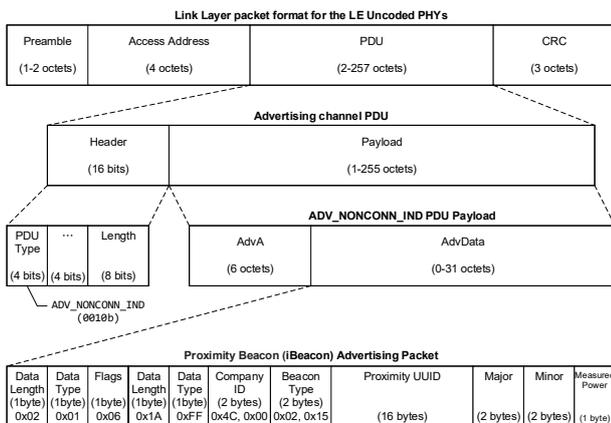


図 1 ビーコンのパケット構造例[6]

Figure 1 Example of packet structure from beacons.

表 1 BLE 機器で用いられる周波数

Table 1 Frequencies used for BLE devices.

RF Channel	RF Center Frequency (f [MHz])	Channel Index	Type: Primary Advertising	Wave Length (λ [m])
0	2402	37	●	0.1248
1	2404	0		0.1247
2	2406	1		0.1246
...
11	2424	10		0.1237
12	2426	38	●	0.1236
13	2428	11		0.1235
14	2430	12		0.1234
...
38	2478	36		0.1210
39	2480	39	●	0.1209

BLE のアドバタイジングのうち、ここでは Primary Advertising のみを扱う。表 1 に示す通り、これは Channel Index 37 (2,402 MHz), 38 (2,426 MHz), 39 (2,480 MHz) の 3

つの周波数帯を利用している。これらは、同じ 2.4GHz 帯を利用する Wi-Fi (IEEE 802.11b/g) の 1ch, 6ch, 11ch と干渉しない周波数帯となっている。

3. 電波強度と測距における課題

3.1 自由空間における理論値

BLE ビーコンの一般的な利用方法は、特定のエリアに該当するビーコンから電波を受信したときに、エリア内に入ったと判定するものである。

一方、受信電力あるいは受信信号強度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) から送受信機間の距離を推定し、三角測量などによって位置を求めようとする取組みがある。

距離と受信電力の関係を表すものとして、遮蔽や反射のない自由空間を前提としたフリスの伝達公式がある。これは、送受信電力の比を式 (1) のように表したものである。

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \quad (1)$$

ここで、各変数の意味は以下の通りである。

- d : 送信機から受信機までの距離 [m]
- λ : 波長 [m]
- P_r : 受信電力 [mW]
- P_t : 送信電力 [mW]
- G_r : 受信利得
- G_t : 送信利得

また、RSSI は一般に単位 dBm で表されることから、対数を用いて、式 (2) のようにも表される。

$$p_r = p_t + g_r + g_t - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (2)$$

- p_r : RSSI [dBm], $p_r = 10 \log_{10} P_r$
- p_t : 送信電力 [dBm], $p_t = 10 \log_{10} P_t$
- g_r : 受信利得 [dBi], $g_r = 10 \log_{10} G_r$
- g_t : 送信利得 [dBi], $g_t = 10 \log_{10} G_t$

3.2 反射波を含む理論値

直接波と反射波が合成されて観測される場合を考える。大きさ a_0 の波と、位相差 θ で大きさ a_1 の波の合成波の大きさは式 (3) で表される (i は虚数単位)。

$$|a_0 + a_1 e^{i\theta}| \quad (3)$$

これを用いて、複数の波が合成された場合の送受信電力の比は式 (4) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{P_r}{P_t} &= \left| \frac{\lambda}{4\pi d} + \sum_{k=1}^n \left(r_k \frac{\lambda}{4\pi d_k} e^{i \frac{2\pi(d_k-d)}{\lambda}} \right) \right|^2 G_r G_t \\ &= \left| 1 + \sum_{k=1}^n \left(\frac{r_k d}{d_k} e^{i \frac{2\pi(d_k-d)}{\lambda}} \right) \right|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \end{aligned} \quad (4)$$

- k : 反射波のインデックス, $k=1,2,\dots,n$
- n : 反射波の数

d_k : 反射波 k の経路長 [m]
 r_k : 反射波 k の反射係数

式 (1) と式 (4) から、このモデルの下で、反射波による変化(係数)は $\left|1 + \sum_{k=1}^n \left((r_k d / d_k) e^{i2\pi(d_k - d) / \lambda} \right)\right|^2$ であると言える。

一般に、大地反射のみ ($n=1$) を想定した 2 波モデルは、反射係数 $r_1 d / d_1 \approx -1$ と仮定している。この結果、電力の比は式 (5) で表される。

$$\begin{aligned} \frac{P_r}{P_i} &= \left| 1 - e^{i\frac{2\pi(d_1 - d)}{\lambda}} \right|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_i \\ &= \left| 2 \sin \left(\frac{2\pi(d_1 - d)}{2\lambda} \right) \right|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_i \\ &= \sin^2 \left(\frac{\pi(d_1 - d)}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\lambda}{2\pi d} \right)^2 G_r G_i \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 受信信号強度の実測値と課題

自由空間を前提とすれば、式 (2) を元に変形した式 (6) を用い、適当な既知の地点で値 C (式 (7)) を校正することによって、RSSI 値 p_r から距離 d が求められると考えられる。

$$\begin{aligned} d &= \frac{\lambda}{4\pi} 10^{\frac{p_r + g_r + g_i - p_i}{20}} \\ &\approx 1.122^{-p_r} \cdot C \end{aligned} \quad (6)$$

$$C = \frac{\lambda}{4\pi} 10^{\frac{p_i + g_r + g_i}{20}} \quad (7)$$

しかし、実際には以下のような課題がある。

3.3.1 周辺環境

屋外では、地面による反射などの影響がある。実測値の例を図 2, 3 に示す。大地反射のみを考慮した 2 波モデルに近い形を示しているが、この単純なモデルであっても、逆関数が存在せず、単純に RSSI から距離を求めることはできない。

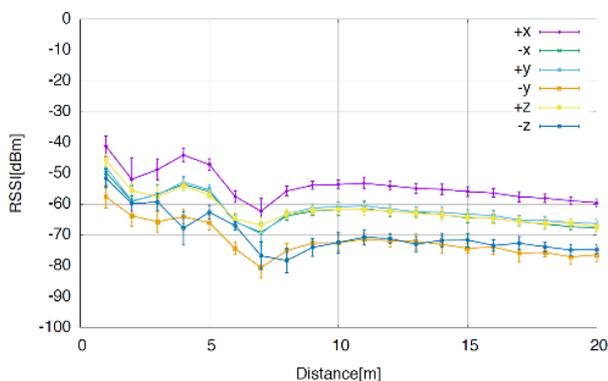


図 2 距離と RSSI の関係 (屋外, Nexus 5X)
 Figure 2 Relationship between distance and RSSI (outdoor, Nexus 5X).

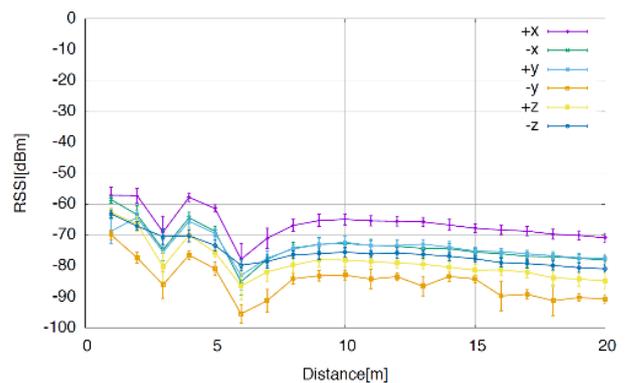


図 3 距離と RSSI の関係 (屋外, SGP612)
 Figure 3 Relationship between distance and RSSI (outdoor, SGP612).

屋内では、床・天井・壁の反射の他に壁や柱による遮蔽などもあり、理論値算出のためのモデル構築自体が困難である。実測値の例を図 4, 5 に示す。

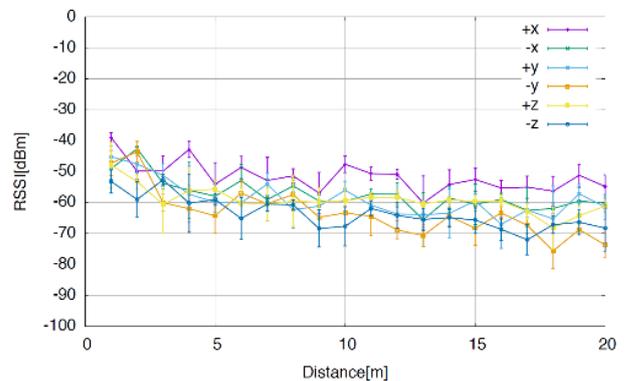


図 4 距離と RSSI の関係 (屋内, Nexus 5X)
 Figure 4 Relationship between distance and RSSI (indoor, Nexus 5X).

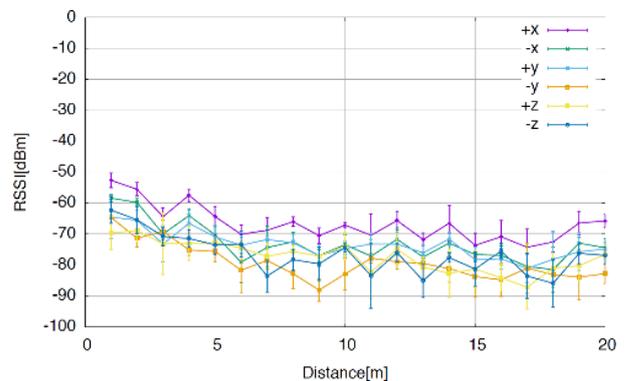


図 5 距離と RSSI の関係 (屋内, SGP612)
 Figure 5 Relationship between distance and RSSI (indoor, SGP612).

3.3.2 ビーコン・端末の仕様や個体差

式 (1) における P_r, G_r, G_t は、一意に定まらない。これを解消するため、事前に実測値をアダプタイジングの packets に含めている製品もある。例えば iBeacon では、ペイロードの最後のオクテットが Measured Power (1m 地点での RSSI 値) となっている。ただし、すべてのビーコンについて校正が行われているわけではない。また、この仕組みを利用できたとしても、補正可能なのはビーコン側の個体差 $P_r + G_t$ だけである。図 2, 3, 4, 5 からわかる通り、 G_r も端末ごとに大きく異なる。

3.3.3 アダプタイジングのチャンネル切替

2 章で述べた通り、アダプタイジングには 3 つの周波数帯 (チャンネル) が利用される。送信側は 10 ms 以内の短い間隔でそれぞれのチャンネルを用いたアダプタイジングの packets を送信している。しかし、受信側になる一般的なスマートフォンなどの端末は、これらの連続した 3 つのチャンネルの packets を一度に受信することはできず、一定間隔で切替えながら受信を行っている。この切替えの間隔は端末によって異なる。

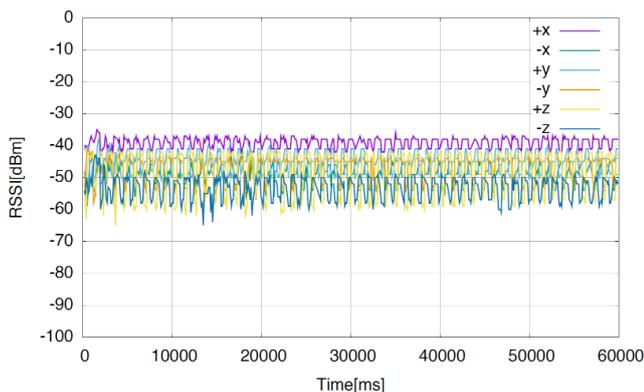


図 6 RSSI の時間経過による変化 (Nexus 5X)

Figure 6 Change in RSSI over time (Nexus 5X).

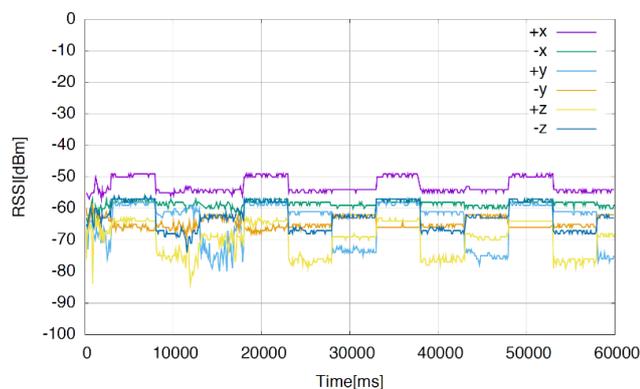


図 7 RSSI の時間経過による変化 (SGP612)

Figure 7 Change in RSSI over time (SGP612).

測定の結果、arrows M03 (Fujitsu)・Zenfone 3 Z017DA (ASUS)・Nexus 5X (LG, Google) では、1 周期 1 秒前後のチ

ヤネル切替えに起因すると考えられる RSSI の変化があった。また、Nexus 9 (HTC, Google)・Xperia Z3 Tablet Compact SGP612 (Sony) では 1 周期 15 秒で 5 秒ずつ異なるチャンネルを利用していると考えられる変化があった。測定結果の一部を図 6, 7 に示す。

既存の研究 [1] では、これらの変化はノイズの一種として扱い、平均をとるなどの処理を行っていた。

3.3.4 指向性

図 2 から 7 には、6 つの異なる方向からの測定結果が示されている。一般に、ビーコンは指向性を考慮した使用方法をとらないが、これらの結果からもわかるように、方向によって受信信号強度に大きな差がある。本稿ではこの指向性については扱わない。

4. 周波数差を利用した距離推定手法

ここでは、3.3.3 項の特徴を利用し、3.3.1 項におけるマルチパスフェージングや 3.3.2 項の個体差をある程度無視できる距離推定手法を提案する。具体的には、周波数の異なる複数の受信信号強度から、直接波のみの受信電力を推定し、自由空間モデル (式 (6)) から距離を求める手法を提案する。

まず、周波数帯 u で受信された受信信号強度を $P_r(u)$ とおく (式 (8))。

$$P_r(u) = \left| 1 + \sum_{k=1}^n \left(\frac{r_k d}{d_k} e^{i \frac{2\pi(d_k - d)}{\lambda_u}} \right) \right|^2 \left(\frac{\lambda_u}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t P_t \quad (8)$$

u : 周波数帯 (Channel Index)

λ_u : 周波数帯 u の中心周波数の波長 [m]

ここで、最終的に求めたい値 d の他に、 d_k, r_k, G_r, G_t, P_t が未知である。ただし、送受信機器が予め決まっている場合、 G_r, G_t, P_t を測定しておくことは可能である。

周波数帯 u の波長 λ_u は、光速 299,792,458 [m/s] を各チャンネルの周波数帯の中心周波数 [Hz] で割って波長 [m] を求める。波長はおよそ以下ようになる。

$$\lambda_{37} \approx 0.1248,$$

$$\lambda_{38} \approx 0.1236,$$

$$\lambda_{39} \approx 0.1209$$

$a_k = \frac{r_k d}{d_k}$, $b_k = d_k - d$ とおき、2 つのチャンネル u, u' の受信電力

(dBm ではなく mW) の比を求めると、式 (9) のように未知の変数は a_k, b_k の 2 つとなる。

$$\frac{P_r(u')}{P_r(u)} = \frac{\left| 1 + \sum_{k=1}^n a_k e^{i \frac{2\pi b_k}{\lambda_{u'}}} \right|^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^n a_k e^{i \frac{2\pi b_k}{\lambda_u}} \right|^2} \left(\frac{\lambda_u}{\lambda_{u'}} \right)^2 \quad (9)$$

ここで、式 (10) において、現実的な範囲内で、 $\varepsilon(37,38)^2 + \varepsilon(38,39)^2 + \varepsilon(39,37)^2$ が最小になる a_k, b_k の組合

せを探索する.

$$\varepsilon(u', u) = \frac{P_r(u')}{P_r(u)} \frac{\left| 1 + \sum_{k=1}^n a_k e^{i \frac{2\pi b_k}{\lambda_{u'}}} \right|^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^n a_k e^{i \frac{2\pi b_k}{\lambda_u}} \right|^2} \left(\frac{\lambda_u}{\lambda_{u'}} \right)^2 \quad (10)$$

a_k, b_k が決定した後, $k=2,3,\dots$ について, 順に探索を繰り返すこととした. a_k, b_k が求められれば, 反射波の影響(係数) $\left| 1 + \sum_{k=1}^n (a_k e^{i 2\pi b_k / \lambda}) \right|^2$ が計算でき, 直接波のみの受信電力が推定できる.

これらの a_k, b_k の値は, 位置によって異なるため, 移動する度に算出しない必要がある. よって, 以下の実験でも位置毎に独立に算出されている.

1cm 程度の移動ごとに測定ができる環境であれば, a_k, b_k の変化もある程度連続的になると考えられるため, 直前の位置で算出した値を手掛かりとして, 次の値を求めることができる可能性がある. ここでは, そういった手法はここでは扱わない.

5. 数値実験

本章の実験において, 提案手法における a_k, b_k の探索はすべて, まず, $-1 \leq a_k \leq 1, 0 \leq b_k \leq 5$ の範囲で行い, その最適値をもって, $|a_k| \leq |a_{k-1}|, 0 \leq b_k \leq 5$ ($k=2,3,\dots,n$) の探索を繰り返した.

5.1 理論値における実験

図 8 は, 送受信機が地上 1m にある場合において, 大地反射のみを考慮した式 (5) によって求められる理論値を, BLE アドバタイジングの周波数帯 (チャンネル) 別にプロットしたものである.

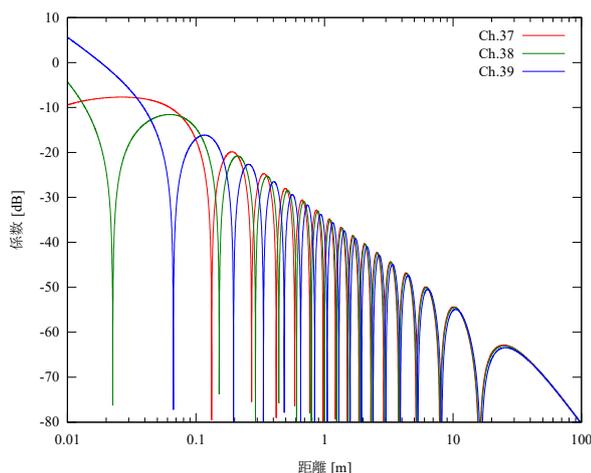


図 8 2 波モデルにおける RSSI

Figure 8 RSSIs in two-rays ground reflected model.

これら 3 つの周波数帯の受信信号強度を元に, 相乗平均 (対数表記である RSSI をそのまま相加平均したもの), 相

加平均, 4 章で述べた手法の 3 つの方法で直接波のみの受信電力を推定した結果が図 9 である.

この結果から, 目的とする直接波のみの理論値との差の RMS (root mean square) 値は, 提案手法 (4.32)・相加平均 (4.63)・相乗平均 (6.14) の順であり, 提案手法が有効であると言える. しかしながら, 計算の過程で a_k, b_k の理論値が得られているわけではなく, 適当な近似値が得られたに過ぎない.

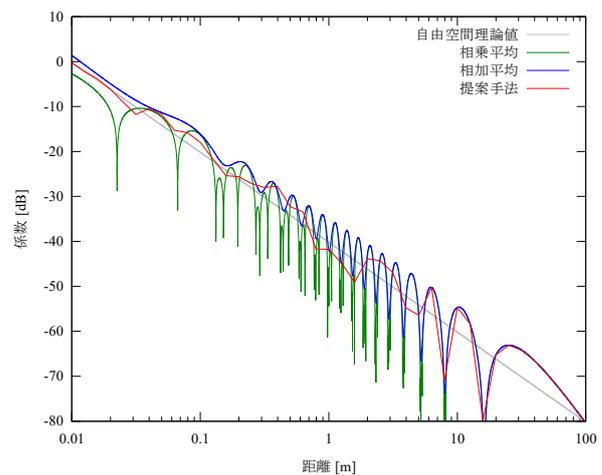


図 9 直接波の RSSI の推定結果

Figure 9 Estimated RSSIs of direct wave.

5.2 実測値における実験

屋内環境における RSSI の実測値 (図 10) を元に, 5.1 節と同様の数値実験を行った. 受信機としてスマートフォンを用いた. ここで, アドバタイジングの受信のみを行う Scanner を作成するための API が存在し, それを利用して RSSI も入手することができる. しかし, どのチャンネルから受信したかは入手することができなかった. このため, チャンネル毎に異なる情報を送信する特殊なビーコンを開発し, 受信内容によってチャンネルを判別する仕組みを作ることによって実験を行った.

5.1 節と同様の方法で得られた結果を図 11 に示す. 自由空間における理論値との比較では, RMS の小さい順に相乗平均 (4.03)・相加平均 (4.05)・提案手法 (4.23) の順に, 目的とする理論値に近い値が得られており, 提案手法が有効であるとは言えない. ただし, ここでは理論値のオフセットを実測値にできるだけ近づける形で設定したが, これが実際の信号出力や利得から求められる理論値と一致しているとは限らず, オフセットの設定によって順位が変動するため, 手法間の差があまりないと言える.

また, 提案手法は, 探索の初期値の範囲をの変更によって改善できる可能性がある. 最適値を求める上で, $k=1$ から順に決定する, いわゆる貪欲法を用いていたが, より適切な最適化を行うことによって改善する可能性もある.

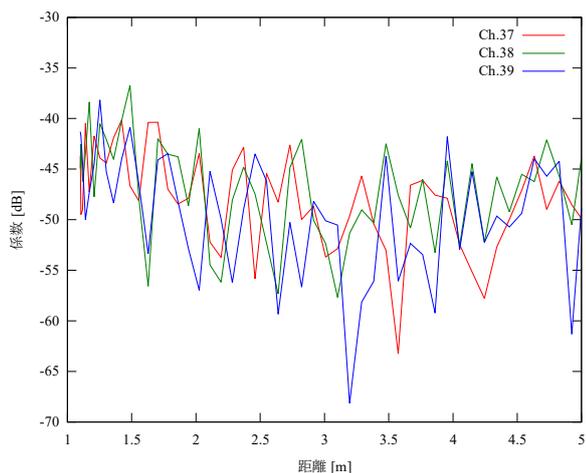


図 10 屋内 RSSI 測定結果
Figure 10 Measured indoor RSSIs.

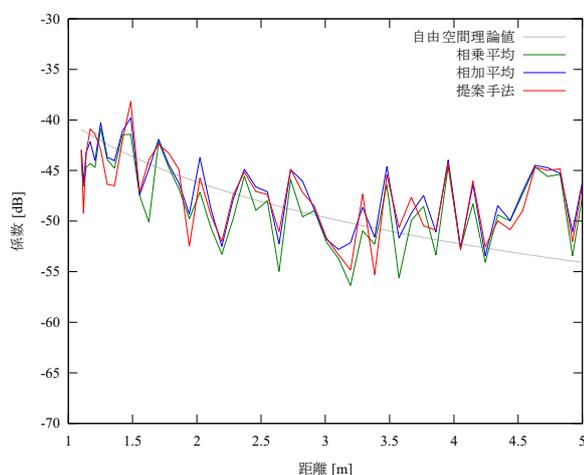


図 11 直接波の RSSI の推定結果 (2)
Figure 11 Estimated RSSIs of direct wave (2).

6. おわりに

BLE ビーコンを用いた測距の精度向上のために、アドバタイジングに用いられる複数の周波数帯の受信信号強度を利用する手法を提案した。また、周波数帯毎の受信信号強度を容易に得るための特殊なビーコンを作成し、実験に用いた。

提案手法は概ね良好な精度であったが、条件により単純な相加平均の方が良い結果が得られた。提案手法は、探索範囲の初期値のチューニングによって更に精度向上できる可能性がある一方、どんな工夫をしても計算量で相加平均に劣る。

相乗平均は、理論値での実験をはじめ、多くの場合相加平均より劣る結果になる。しかし、一般的なソフトウェア開発に用いるインターフェースから得られる RSSI [dBm] の値をそのまま扱えば (相加平均すれば) 良いため、多くの

場合、実装は最も簡潔になる。

更に精度の向上を行う方法として、最適化アルゴリズムの改良や利用する周波数帯を増やすことが考えられる。後者は、Wi-Fi の 6ch, 11ch の間 (2,452 [MHz] など) が候補として挙げられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 16K01246 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 古館達也, 堀川三好, 工藤大希, 岡本 東, 橋本和幸: Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた歩行者測位手法の提案, 第 15 回情報科学技術フォーラム (FIT2016), M-028 (2016)
- [2] Bluetooth SIG Proprietary: Bluetooth Core Specification v5.0, Vol.6 (2016)
- [3] 株式会社イーアールアイ: BLUETUS, <http://www.bluetus.jp/>,
- [4] Apple: What's New in Core Location, <https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2013/307/>
- [5] Google, Google Beacons, <https://developers.google.com/beacons/>
- [6] Apple: Proximity Beacon Specification, Release R1 (2015)