



## 修士論文

BLE 電波減衰を利用した位置測定システムの  
構築と位置測定誤差の有用性の調査

早稲田大学大学院基幹理工学研究科  
情報理工・情報通信専攻

平川 翔一郎

学籍番号            5118F088-0

提出                日付 2020/01/29

指導教授            中島達夫

**A research and evaluation on a locating system  
using attenuation of BLE radio wave**

**Shoichiro HIRAKAWA**

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of  
the Requirements for the Degree of  
**Master Engineering**

Student ID 5118F088-0

Submission Date Jan 29, 2020

Supervisor Professor Tatsuo Nakajima

Department of Computer Science and Communications  
Engineering, the Graduate School of  
Fundamental Science and Engineering of Waseda University

## 概要

近年、屋内での位置測定が難しい GPS に代わる技術として、Wi-Fi や RFID, BLE の電波を利用した屋内測位技術が進められている。その中でも BLE はその小型、安価、省電力といった特徴から、IoT 化が加速する現代において注目されている。一方で BLE には干渉や反射、減衰が大きいという特徴もあり、BLE を用いた位置測定は誤差が大きいという問題点がある。

本研究では BLE を利用した以下の 2 つの特徴を持つ位置測定システムを構築し、また評価した。

(1) 機械学習等の高度な技術を必要とせず、個人で簡単に利用できるもの

(2) 障害物による減衰を考慮し、より精度の高い位置情報を得るもの

また、人が探し物をする際にどの程度の誤差の位置情報ならば有用と感じるのかについて調査した。

結果としては、電波の減衰を考慮することにより位置測定の精度を 10%程度向上させることができた。また、人がどのような条件下でどの程度の誤差の位置情報を求めるのかについての知見を得ることができた。

# 目次

<b>第 1 章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 背景.....	1
1.1.1 位置測定技術の変遷・GPS 技術の問題点 .....	1
1.1.2 屋内位置測定技術 .....	1
1.1.3 Wi-Fi 及び RFID の問題点 .....	2
1.1.4 BLE の可能性と現状 .....	2
1.1.5 BLE 技術の未来 .....	3
1.2 研究の目的.....	3
1.3 本研究の貢献.....	4
1.4 論文の構成.....	4
<b>第 2 章 関連研究</b> .....	<b>6</b>
2.1 BLE beacon を用いた位置測定に関する研究.....	6
2.2 障害物に着目した位置測定に関する研究.....	7
<b>第 3 章 事前実験</b> .....	<b>8</b>
3.1 様々な物質による BLE 電波の減衰率の調査 .....	8
3.1.1 使用する物質.....	8
3.1.2 実験手法.....	8
3.1.3 電波減衰実験の結果.....	10
3.2 日常的な障害物による BLE 電波の減衰率の調査 .....	10
3.2.1 実験の概要.....	10
3.2.2 実験結果.....	10
<b>第 4 章 実装・設計</b> .....	<b>12</b>
4.1 電波強度(RSSI)と距離の関係 .....	12
4.2 理論値と実測値の整合性の調査.....	12
4.3 本システムにおける距離算出手法.....	15
4.4 本システムにおける位置推定手法.....	16
4.4.1 三点測量法による位置推定手法の概要.....	16

4.4.2	本システムにおける位置推定手法.....	17
4.5	障害物を考慮した位置測定.....	18
4.5.1	電波減衰マップの作成.....	18
4.5.2	障害物を考慮した位置測定のアプローチ.....	19
<b>第5章</b>	<b>位置測定実験.....</b>	<b>20</b>
5.1	実験の概要.....	20
5.1.1	実験環境.....	20
5.1.2	実験方法.....	20
5.2	実験結果.....	21
<b>第6章</b>	<b>評価実験.....</b>	<b>24</b>
6.1	評価実験の概要.....	24
6.1.1	被験者の内訳.....	24
6.1.2	事前調査.....	24
6.1.3	本実験.....	25
6.2	実験結果.....	26
<b>第7章</b>	<b>考察.....</b>	<b>35</b>
7.1	事前実験に関する考察.....	35
7.1.1	様々な物質による減衰率調査に関する考察.....	35
7.1.2	日常的な障害物による減衰率調査に関する考察.....	35
7.2	位置計測実験に関する考察.....	36
7.3	評価実験に関する考察.....	37
7.3.1	位置計測実験の誤差と評価実験の結果に関する考察.....	37
7.3.2	重要性及び緊急性に関する考察.....	38
7.4	日常生活を想定した本システムの有用性に関する考察.....	38
<b>第8章</b>	<b>結論・将来課題.....</b>	<b>40</b>
8.1	結論.....	40
8.2	将来課題.....	40
8.2.1	より多くの減衰率調査の必要性.....	40

8.2.2 精度のさらなる向上の必要性.....	40
参考文献.....	41
謝辞.....	43

# 図目次

図 2.1 計測機器と BLE デバイス間の 3 つの状態	7
図 3.1 電波減衰実験の概要図	9
図 3.2 4 つの日常的な障害物	10
図 4.1 部屋 L における電波強度の実測値と理論値	13
図 4.2 部屋 M における電波強度の実測値と理論値	14
図 4.3 部屋 S における電波強度の実測値と理論値	14
図 4.4 基準地点と各距離の電波強度の差分	15
図 4.5 部屋 M における電波強度の実測値と近似曲線	16
図 4.6 三点計測法の概略図	17
図 4.7 本システムにおける位置推定の概略図	17
図 4.8 電波減衰マップの一例	18
図 4.9 障害物入力画面	18
図 4.10 位置推定アルゴリズムのフローチャート	19
図 5.1 測定する 3 箇所	20
図 5.2 グループ 1 の BLE デバイス設置箇所	21
図 5.3 グループ 2 の BLE デバイス設置箇所	21
図 6.1 誤差 3m における重要性ごとの調査結果	26
図 6.2 誤差 2.5m における重要性ごとの調査結果	27
図 6.3 誤差 2m における重要性ごとの調査結果	27
図 6.4 誤差 1.5m における重要性ごとの調査結果	28
図 6.5 誤差 1m における重要性ごとの調査結果	28
図 6.6 誤差 3m における緊急性ごとの調査結果	29
図 6.7 誤差 2.5m における緊急性ごとの調査結果	29
図 6.8 誤差 2m における緊急性ごとの調査結果	30
図 6.9 誤差 1.5m における緊急性ごとの調査結果	30
図 6.10 誤差 1m における緊急性ごとの調査結果	31
図 6.11 誤差 3m における頻度ごとの調査結果	32
図 6.12 誤差 2.5m における頻度ごとの調査結果	32
図 6.13 誤差 2m における頻度ごとの調査結果	33
図 6.14 誤差 1.5m における頻度ごとの調査結果	33

図 6.15 誤差 1m における頻度ごとの調査結果 .....	34
----------------------------------	----

## 表目次

表 3.1 各物質の電波強度減衰率.....	10
表 3.2 日常的な障害物による BLE 電波の減衰率.....	11
表 4.1 部屋 L における電波強度の実測値と理論値 .....	13
表 4.2 部屋 M における電波強度の実測値と理論値 .....	13
表 4.3 部屋 S における電波強度の実測値と理論値 .....	14
表 5.1 グループ 1 の障害物考慮あり/なしの測定結果 .....	22
表 5.2 グループ 2 の障害物考慮なしの測定結果.....	22
表 5.3 グループ 2 の障害物考慮ありの測定結果.....	22
表 5.4 誤差の平均値及び分散.....	23
表 6.1 物及び場面のシナリオ.....	25
表 6.2 誤差と物が存在する可能性のある範囲の面積の対応表.....	25
表 6.3 誤差と実験に使用した部屋の面積の対応表.....	26
表 7.1 各シナリオ及び誤差において有用だと感じた人の割合.....	37
表 7.2 各誤差の結果からわかること.....	37
表 7.3 各頻度・誤差における有用だと思ふ人の割合.....	38
表 7.4 誤差の範囲ごとの確率表.....	39
表 7.5 シナリオと頻度の平均点数の関係.....	39

# 第1章 序論

## 1.1 背景

### 1.1.1 位置測定技術の変遷・GPS技術の問題点

近年、位置測定技術はカーナビゲーションや航空機の支援[1]、防犯[2]など様々な分野に活用され、その重要性から目覚ましい発展を遂げた。特に GPS(Global Positioning System)は今や電子機器においてなくてはならない技術の1つとなっている。しかし、GPSには大きな問題点がある。それは、「屋内での位置測定に利用することができない」という点だ。人工衛星との通信が必要なGPSにおいては、屋内の端末との通信の際に精度が極めて悪化するのである。そこで、屋内での位置測定を可能にする、GPSに代わる新しい技術が注目されている。

### 1.1.2 屋内位置測定技術

現在、屋内位置測定技術として利用されている代表的な技術は、Wi-Fi測位、RFID測位、BLE測位の3つである。

Wi-Fi測位は、複数のWi-Fiアクセスポイントと端末間の電波強度を測定し、それを用いた三角測量によって位置を測定するというものだ。さらに近年では、機械学習を利用した位置測定や、ロボットを活用した位置測定[4]の研究も進められており、さらなる精度向上が期待されている。誤差については、M Avvasらの研究[5]ではWi-FiとDeepLearningの組み合わせにより37m×17mの部屋で平均2.64mの精度、14.5m×4.5mの部屋で平均1.21mという高精度を達成している。

RFID(radio frequency identifier)測位は、予めRFIDタグを位置を知りたいものに取り付けておき、専用のリーダーでそのタグを読み取ることにより位置を測定するというものだ。最近の研究では、MIT(マサチューセッツ工科大学)がRFIDをロボットに搭載[6]し、誤差数センチの精度での位置の把握に成功した。

BLE (Bluetooth Low Energy) 測位は、Wi-Fi測位と同様に、電波強度を用いた三角測量による測定や、機械学習を利用した位置測定技術の研究が進められている。詳しくは2章にて述べる。

### 1.1.3 Wi-Fi 及び RFID の問題点

前項で述べた3つの技術のうち、精度だけを見るとWi-FiおよびRFIDを用いた位置測定が優れているように思われるが、実はこれら2つの技術にはいくつかの問題がある。

まず1つ目の問題として挙げられるのは、「時間的なコスト」だ。Wi-Fiについては、現状、Wi-Fi通信技術が搭載されているのはごく一部の端末に限られるため、測定したいものにWi-Fi通信技術が搭載されていない場合には新たに取り付ける必要がある。またRFIDについても同様に、測定したいものにタグを取り付ける必要がある。これらには大変手間がかかるという点で問題がある。

次に問題として挙げられるのは、「空間的なコスト」だ。Wi-FiモジュールやRFIDタグは年々小型化が進んでいるものの、それらは3~10cm<sup>2</sup>程度の取り付けスペースを必要とする。

最後に問題として挙げられるのは、「費用的なコスト」だ。Wi-Fi通信技術やRFIDタグは、Wi-Fiモジュールのチップが8ドル程度、RFIDタグが1~2ドル程度と、決して安価とは言えない費用的なコストが発生するという問題点が挙げられる。

これらの問題がWi-Fi測位及びRFID測位の普及を阻害する要因となっている。

### 1.1.4 BLE の可能性と現状

BLEは、1.1.3項で述べたWi-FiおよびRFIDの問題点を解決することができる技術として注目されている。その理由は、BLEには「小型」「安価」「省電力」という3つの特徴があるからだ。

まず、BLEは「小型」という特徴がある。BLE通信機能を搭載したチップは最小のものだと1cm<sup>2</sup>程度と、Wi-Fi通信チップやRFIDタグと比較しても非常に小型である。

次にBLEには「安価」という特徴がある。BLE通信のチップは数十セント~1ドル程度と、Wi-Fi通信チップ、RFIDタグと比較しても非常に低コストである。

最後に、BLEには「省電力」という特徴がある。ボタン電池1つで2~3年間使用できるほどの省電力も、BLEの特徴の1つである。

これら3つの特徴を持ったBLE技術は、Wi-Fi測位およびRFID測位が抱える問題を解決する技術として注目されている。

しかし一方で、BLEを用いた位置測定技術はまだ発展途上である。関連研究の章(2章)にて詳しく述べるが、まず他のWi-FiやRFIDを用いた位置測定手法と比較して、位置測定の精度が悪いことが挙げられる。これは、Wi-Fiなど他の電波と比べてBLEが

用いている電波の波長が短く、反射や干渉といった影響が大きくなってしまふこと、そして BLE はその性質上電波強度自体が他の電波と比べて小さいため、減衰等により誤差が大きくなってしまふことが原因として挙げられる。

さらに、現在用いられている BLE による位置測定の主な手法は、「予め設置した複数の BLE 機器からものの位置を学習させ、その学習データを元に特定したいものの位置を推定する」というものだ。この手法は、位置測定を開始するまでの下準備として大きな手間がかかり、また機械学習や BLE 技術についての深い知識を必要とするため、スーパーマーケットや倉庫等での大規模な商用利用はできるものの、個人が利用することは難しい。

### 1.1.5 BLE 技術の未来

BLE 技術は、1.1.4 項でも述べたように、その「小型」「安価」「省電力」という特徴から、急速に発展する IoT 化における重要な技術として注目されている。近い未来に、様々なものが BLE 技術を利用してインターネットと繋がる IoT 社会が到来する可能性が示唆されている。

## 1.2 研究の目的

本研究は、大きく 3 つの目的を持って行われた。

1 つ目の目的は、BLE 電波の強度が物質・障害物ごとにどのような減衰を示すのかを調査することだ。BLE 電波は障害物によって電波強度が大きく減衰することが知られている一方で、どのような物質・障害物がどれくらいの減衰を示すのかについて詳しく調査されていない。本研究では、身の回りにある様々な物質や日常生活で用いられる物体について、それぞれどの程度 BLE 電波強度を減衰させるのかについての調査を行なった。

2 つ目の目的は、1.1.5 項で述べたような BLE 技術による IoT 社会が到来し、あらゆるものが BLE 通信を介して繋がる未来を想定し、その中で個人が利用できるよう BLE 通信を用いた位置測定が、どの程度の誤差になるのかを調査することである。シナリオとしては、自室にいる個人が BLE 電波による位置測定技術を利用して探し物をす

るという設定である。また、構築する位置測定システムは、以下の2つの特徴を持つものを実装した。

(3) 機械学習等の高度な技術を必要とせず、個人で簡単に利用できるもの

(4) 障害物による減衰を考慮し、より精度の高い位置情報を得るもの

(1)の特徴により、1.1.4項で述べたような、「現状の位置測定技術の個人利用への障壁が高い」という問題を解決し、また(2)の特徴により、位置測定の誤差を大きくする要因の1つである障害物による電波の減衰を考慮し、「より精度の高い位置測定を行う」ことができるシステムの構築を目指した。

3つ目の目的は、個人が位置測定技術を利用して探し物をする際に、どの程度の誤差ならば有用と感じるのかを調査することである。そして、構築したシステムから得られた位置測定の誤差とその調査結果を比較し、考察する。

### 1.3 本研究の貢献

本研究の貢献は以下の4点である。

- ・様々な物質及び身の回りの障害物における BLE 電波の減衰率を調査したこと
- ・高度な技術・知識を必要とせず、個人で利用できる位置測定手法を提案したこと
- ・BLE 電波減衰を利用し、位置測定精度の向上に成功したこと
- ・個人がどの程度の誤差の位置情報ならば探し物をする際に有用だと思えるかを調査したこと

### 1.4 論文の構成

本研究は8つの章から構成される。

1章では、導入として本研究の背景及び目的、そして貢献について述べた。2章では、本研究に関連する他の研究について述べる。3章では、様々な物質・障害物についての減衰率調査の概要とその結果について述べる。4章では、本研究で作成した位置測定システムの設計・アルゴリズムについて述べる。5章では、4章で得られたシステムを用いて位置測定を行なった結果について述べる。6章では、誤差と有用性の関係について

の評価実験の概要とその結果について述べる。7章では、3章、5章、6章で得られた各実験の結果についての考察を述べる。8章では、本論文を通じて得られた結論と将来課題について述べる。

## 第2章 関連研究

本章では、本研究に関連する他の研究について2つ紹介する。

1つ目に紹介するのは、BLE デバイスによる位置計測データを機械学習させることにより位置計測を行うという研究であり、現在 BLE デバイスを用いた位置測定において最も一般的に行われている手法である。

2つ目に紹介するのは、BLE デバイスを用いた位置計測に、障害物による電波の減衰を考慮した研究である。

### 2.1 BLE beacon を用いた位置測定に関する研究

BLE デバイスを用いた位置測定に関する研究は、BLE デバイスの普及とともに数多く行われてきた[7][8][9][10]. BLE デバイスを用いた一般的な手法は、大きく2つある。

1つ目の手法は、三点測量法である。電波強度や電波の遅延時間から測定機器と BLE デバイスの間の距離を算出し、それを異なる3箇所で行うことにより、位置情報を割り出すという手法だ。これは測定機器と BLE デバイス間に障害物等のない、見通しのいい場所では良い結果を出す一方で、障害物が多くある部屋や天井の低い部屋、他の BLE 機器が多くある部屋など、電波の減衰や反射、干渉の影響が大きい場所においては、精度が著しく低下するという問題点がある。

2つ目の手法は、フィンガープリントを利用した手法である。フィンガープリントとは、ある特定の位置での電波強度 (RSSI (Received Signal Strength Indicator)) 及び位置情報のペア情報である。予め部屋の中にいくつか測定機器を設置し、それらと BLE デバイスとの RSSI 及び BLE デバイスの位置情報を記録する。このデータを予め大量に集めておき、実際に位置計測をする際には計測された各機器との RSSI をこれらのデータと比較し、位置を推定するという手法である。この手法は三点測量法よりも高い精度が実現できる。例えば *Kriz* ら[9]の研究では、Wi-Fi 測量と BLE beacon を組み合わせたフィンガープリント手法で、最大誤差が 2.82m, 平均誤差が 1.08m を実現している。一方でこの手法は、環境が変化した場合もう一度フィンガープリントを収集しなければならないことや、フィンガープリントの収集自体に大きな手間がかかることが問題点としてあげられる。

## 2.2 障害物に着目した位置測定に関する研究

Chen ら[11]は、障害物による電波の減衰を考慮した位置測定についての研究を行った。具体的には、以下の図 2.1 のように計測機器と BLE デバイス間を LOS(見通し、障害物が全くない状態)、p-LOS(部分見通し、一部分が隠れているが完全には隠れていない状態)、NLOS(非見通し、完全に隠れている状態)の3つの状態に分類することで、電波減衰による誤差を小さくし位置精度の向上を目指した。状態の判別には、電波強度の「飛び値」を利用した。一般に障害物がある状態では、その障害物による反射や減衰などにより、何度か電波強度を計測すると飛び値が出ることもある。飛び値とは、他の電波強度の値とは逸脱した値のことである。これを利用し、様々な LOS, p-LOS, NLOS 環境下での電波計測を行い、そのデータを用いて分類機を作ることで状態を判別した。結果としては、誤差の中央値が 1.5m, 最大誤差が 3m となり, Dartle iBeacon Locator<sup>(\*)</sup> よりも 30%精度が向上した。

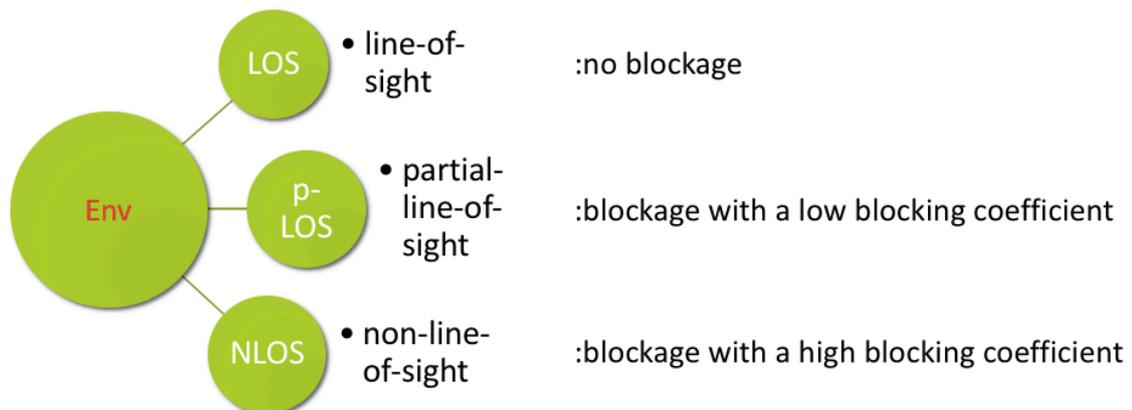


図 2.1 計測機器と BLE デバイス間の 3つの状態

\*1Dartle iBeacon Locator. <https://apps.apple.com/jp/app/dartle-ibeacon-locator/id904211297>  
[accessed on 2020/01/17]

## 第3章 事前実験

物質ごとの BLE 電波の正確な減衰率を算出するため、そして BLE 電波減衰による位置測定精度の向上を図るため、本研究では事前実験として様々な物質による BLE 電波の減衰率の調査[12]、及び日常で探し物が存在する可能性の高い障害物（以下、「日常的な障害物」とする）による BLE 電波の減衰率の調査を行なった。

### 3.1 様々な物質による BLE 電波の減衰率の調査

#### 3.1.1 使用する物質

様々な物質による電波減衰率を調査するため、プラスチックとしてアクリル（厚さ 5mm）及び塩化ビニル（厚さ 2mm）、そして木材（厚さ 12mm）、鏡面ガラス（厚さ 4mm）、ゴム（厚さ 3mm）、ダンボール（厚さ 3mm）の 6 種類の物質を用意し、実験を行なった。

#### 3.1.2 実験手法

実験には、Android 端末 (Nexus 6<sup>[\*2]</sup>)、BLE デバイス (CC2650STK SimpleLink Sensor Tag<sup>[\*3]</sup>)、3.1.1 で示した各物質及びアルミホイルを使用した。アルミホイルが BLE 電波を 100%反射する物質であることを利用し、それらを下図 3.1 のように配置した。

\*2 Google Nexus 6. <https://store.google.com> [accessed on 2020/01/18]

\*3 Texas Instruments Corp. <http://www.tij.co.jp/tool/jp/CC2650STK> [accessed on 2020/01/18]

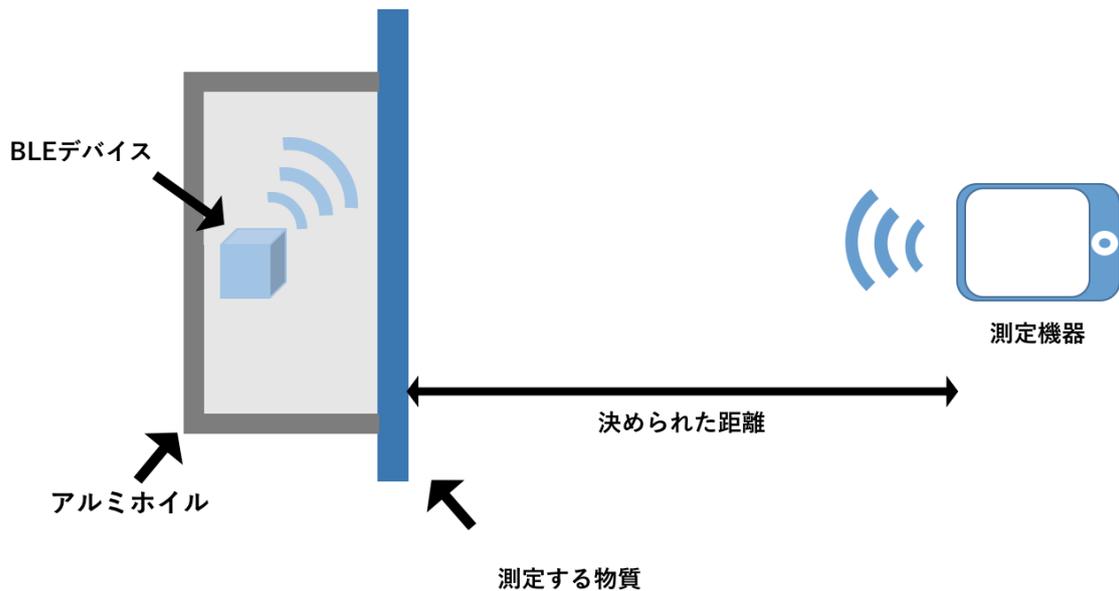


図 3.1 電波減衰実験の概略図

BLE デバイスから発せられた電波は、アルミホイル側からは出ることが出来ず、必ず測定する物質を通過してから測定機器へと到達する。このときの BLE デバイスと測定機器との距離は 0.5m, 1m, 2m, 3m, 4m, 5m とした。それぞれの物質の物質を設置したもの及び物質を設置しないものについて、距離ごとに電波強度の計測を 500 回行い、その平均値をそれぞれの物質と、物質を設置していないものとの比較し、電波強度の減衰率を算出した。電波強度には RSSI(Received Signal Strength Indicator) [dBm]を利用した。dBm (デシベルミリ) とは、電力を、1 ミリワット [mW] を基準としたデシベル [dB] の値で表した単位のことである(式 3.1)。

$$1mW = 0dBm \quad (3.1)$$

すなわち、電力  $P$  [mW] とデシベルミリ  $X$  [dBm] の関係は式 3.2 のようになる。

$$X = 10 \log_{10} \frac{P}{1mW} \quad (3.2)$$

### 3.1.3 電波減衰実験の結果

結果としては、以下の表 3.1 のようになった。

物質名	塩化ビニル	アクリル	木材	ガラス(鏡面)	ゴム	ダンボール
減衰率	3.57%	3.99%	11.3%	47.9%	5.96%	5.67%

表 3.1 各物質の電波強度減衰率

## 3.2 日常的な障害物による BLE 電波の減衰率の調査

### 3.2.1 実験の概要

本研究では日常的な障害物として、クッション、本棚、鞆、毛布の4つ(図 3.2)を用意し、それぞれの下または中に BLE デバイスを設置し、減衰率を調査した。



図 3.2 4つの日常的な障害物（左から順にクッション、本棚、鞆、毛布）

### 3.2.2 実験結果

3.1 項の実験と同様に、BLE デバイスの周りに障害物がない状態と、BLE デバイスが各障害物の下または中にある状態との電波強度をそれぞれ 500 回計測し、その平均値を比較することで減衰率を算出した。結果は、以下の表 3.2 のようになった。

障害物	クッション下	本棚の奥	鞆の中	毛布の下
減衰率の最小値	17.8%	9.93%	8.97%	11.2%
減衰率の最大値	34.5%	53.2%	42.9%	31.0%
減衰率の平均値	24.9%	27.4%	31.4%	20.8%

表 3.2 日常的な障害物による BLE 電波の減衰率

## 4章 実装・設計

本章では、電波強度からどのようにして探し物の位置を特定するのか、また個人が自宅で BLE 通信を用いて探し物をすることができるアプリケーションがどのような設計・アルゴリズムで実装されたのかについて順に説明していく。

### 4.1 電波強度(RSSI)と距離の関係

一般に電波の強度は距離の 2 乗に比例して減衰することが知られている。これは BLE の電波強度においても同様である。測定機器からの距離を算出した BLE デバイスから一定の距離  $D_{st}$  を基準とし、その地点における電波強度を  $X_{st}$  と置き、未知の地点  $D_{unknown}$  における電波強度を  $X_{unknown}$  と置くと、電波強度 [dBm] は式 3.2 のように表すことができることを利用すれば、 $X_{unknown}$  は以下の式 4.1 のように表せる。

$$X_{unknown} = -20 \log_{10} \frac{D_{unknown}}{D_{st}} + X_{st} \quad (4.1)$$

これを  $D_{unknown}$  について解けば、以下の式(4.2)のように表せる。

$$D_{unknown} = D_{st} \cdot 10^{\frac{X_{st} - X_{unknown}}{20}} \quad (4.2)$$

式(4.2)を用いれば、ある地点での電波強度を計測し基準とし、未知の距離における電波強度を計測することで、その地点と BLE デバイスとの距離を算出することができる。

### 4.2 理論値と実測値の整合性の調査

4.1 項で得られた理論値が、実際の計測とどれくらい合致するのかを調査するため、3箇所各距離の電波強度を 500 回測定し、その平均値を理論値と比較した。3箇所はそれぞれ大規模な部屋(部屋 L, 22m × 32m)、中規模の部屋(部屋 M, 6.6m × 4.7m)、小規模の部屋(部屋 S, 3.4m × 3.0m)を利用した。また、計測距離は 0.5m, 1m, 2m, 3m, 4m, 5m とした(ただし部屋 S に関しては部屋の大きさの関係で最大 3m まで計測した。ま

た、部屋 L においては 4m 地点及び 5m 地点において、測定機器と BLE デバイス間での接続が不可であったため、最大 3m まで計測した).

それぞれの部屋 L, M, S での実測値と、0.5m 地点を基準とした理論値との比較を以下の表 4.1, 4.2, 4.3 及び図 4.1, 4.2, 4.3 にそれぞれ示す.

距離[m]	0.5	1	2	3
実測値 [dBm]	-57.7	-61.9	-76.7	-90.5
理論値 [dBm]	-57.7	-63.7	-69.7	-73.2

表 4.1 部屋 L における電波強度の実測値と理論値

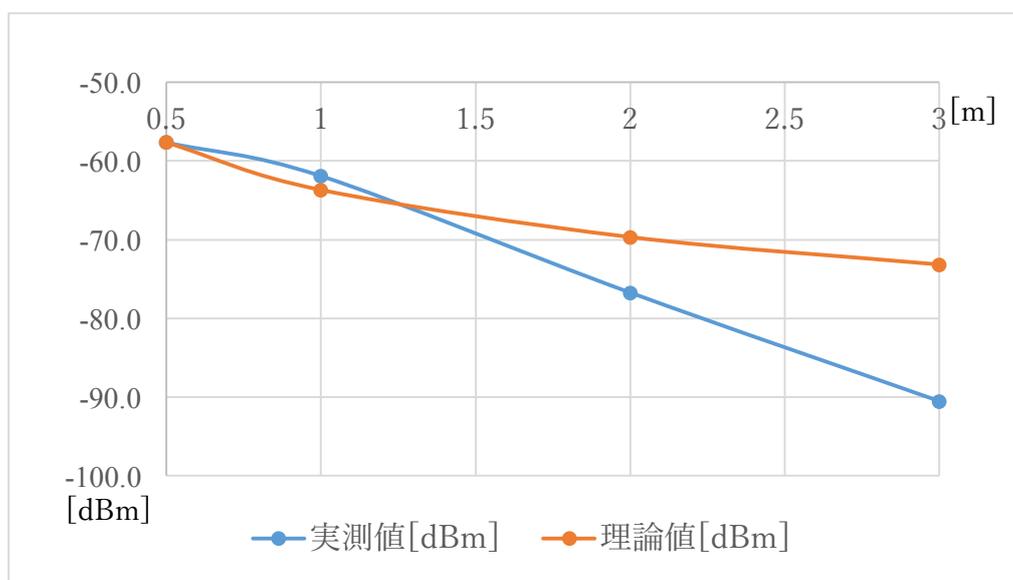


図 4.1 部屋 L における電波強度の実測値と理論値

距離[m]	0.5	1	2	3	4	5
実測値 [dBm]	-61.1	-65.0	-68.4	-69.1	-75.0	-80.6
理論値 [dBm]	-61.1	-67.1	-73.1	-76.7	-79.2	-81.1

表 4.2 部屋 M における電波強度の実測値と理論値

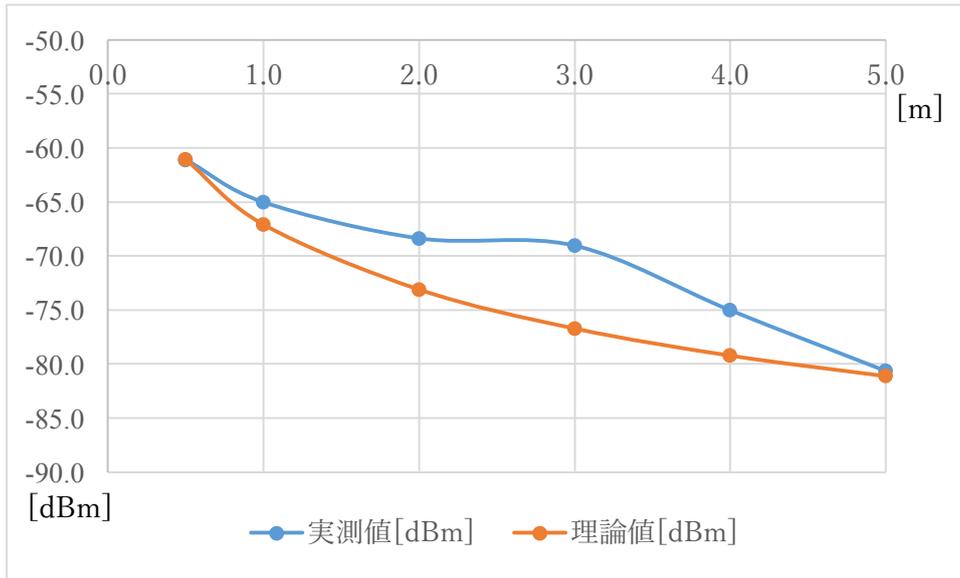


図 4.2 部屋 M における電波強度の実測値と理論値

距離[m]	0.5	1	2	3
実測値 [dBm]	-47.1	-50.7	-59.1	-62.2
理論値 [dBm]	-47.1	-53.1	-59.1	-77.8

表 4.3 部屋 S における電波強度の実測値と理論値

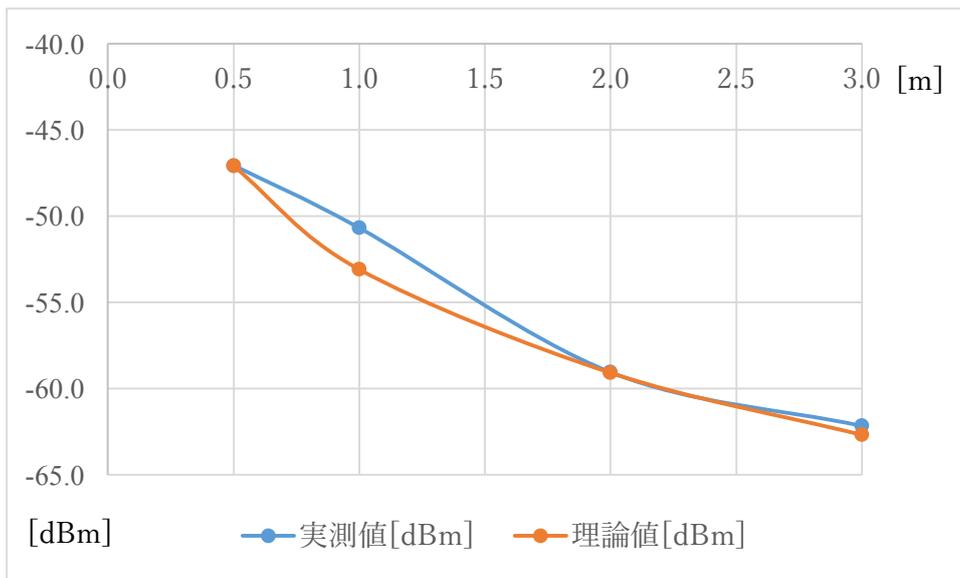


図 4.3 部屋 S における電波強度の実測値と理論値

また、基準地点とした 0.5m 地点の電波強度と、各距離の電波強度の差分を部屋ごとに算出したグラフを以下の図 4.4 に示す。

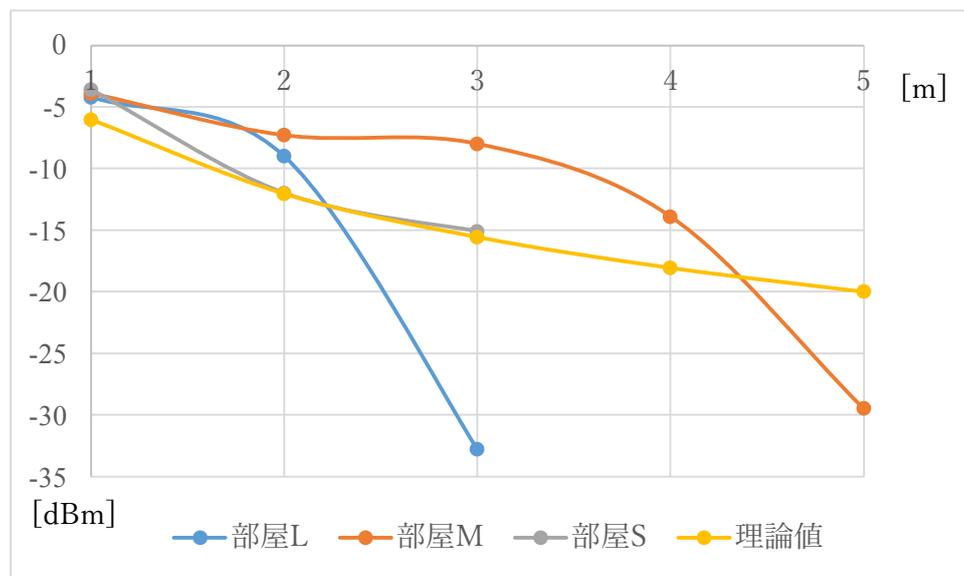


図 4.4 基準地点と各距離の電波強度の差分

これらのデータから、部屋の大きさが小さい場合は理論値に近い電波の減衰を示す一方で、部屋の大きさが大きくなればなるほど、理論値からの乖離が大きくなることがわかる。

### 4.3 本システムにおける距離算出方法

4.2 項で示したように、部屋がある程度の大きさになると理論値からの乖離が大きくなり、精度の良い距離算出をすることが困難になる。そこで本システムでは、各部屋ごとの実測値を元に二次関数の近似曲線を作成し、その式を用いて距離を算出する方法を取る。式の近似には最小二乗法を用いた。以下の式 4.3 及び図 4.5 に部屋 M のデータを用いた近似曲線を示す。ただし、 $y$  は電波強度 [dBm]、 $x$  は測定機器と BLE デバイス間の距離 [m] とした。

$$y = -0.310x^2 - 2.25x - 61.2 \quad (4.3)$$

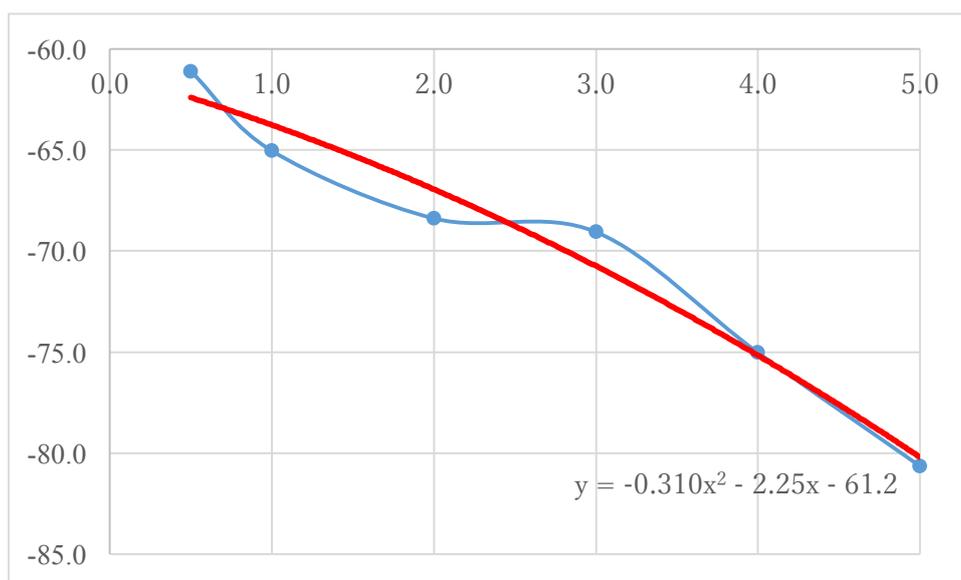


図 4.5 部屋 M における電波強度の実測値と近似曲線

上記で与えられた近似曲線において、ある地点における電波強度を計測することにより、その値を式 4.3 に代入し  $x$  について解けば、測定機器と BLE デバイス間の距離を算出することができる。

## 4.4 本システムにおける位置推定手法

本システムでは、BLE デバイスの位置推定手法として三点測量法を採用した。三点測量法とは、ある 2 物体間の距離はわかるが方向はわからない際に、異なる 3 箇所の 2 物体間の距離を求めれば、位置を推定することができるという手法である。

### 4.4.1 三点測量法による位置推定手法の概要

図 4.6 に三点測量法の概略図を示した。まず地点 A から電波強度の値を用いて距離を算出する。すると方向はわからないが、地点 A を中心とする円上に対象物が存在することがわかる(図 4.6 の青の円)。同様にして地点 B 及び C においても電波強度を計測し円を描く(図 4.6 の緑及び黄の円)。そして、それらの重なる 3 重点に、対象物が存在すると推定できる。

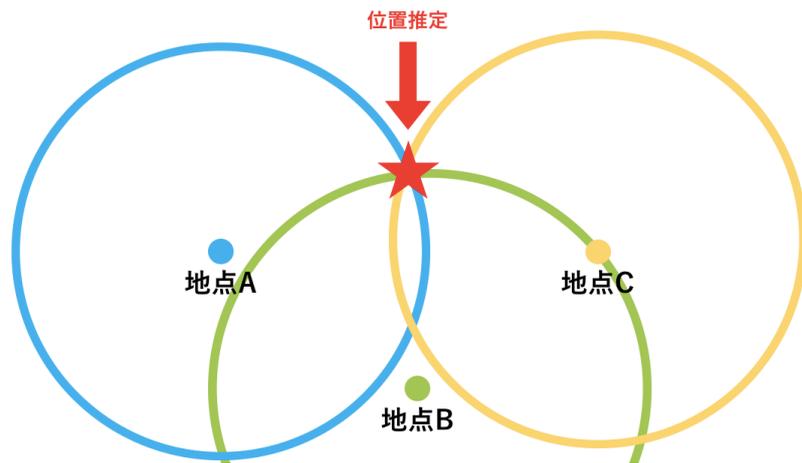


図 4.6 三点測量法の概略図

#### 4.4.2 本システムにおける位置推定手法

4.4.1 項で示したように、各地点から対象物までの距離が正確ならば、3つの円は必ず3重点を形成し、位置推定を行うことができる。しかし本システムでは、距離の推定の際に誤差が生じ3重点が形成されない場合がある。そこで本システムでは、2円間の交点の重心を対象物の位置と推定する。以下の図 4.7 に概略図を示す。

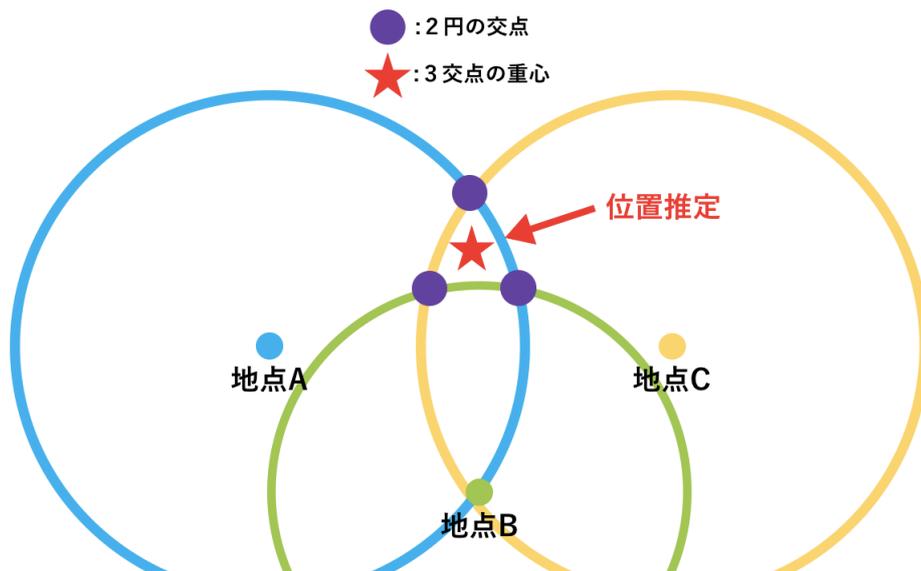


図 4.7 本システムにおける位置推定の概略図

## 4.5 障害物を考慮した位置推定

本システムでは、位置測定の精度を向上させるために事前実験のデータ(3.2 項参照)を利用した位置推定を行う。この項では、どのようにして障害物を考慮した位置推定を行うのかについて説明する。

### 4.5.1 電波減衰マップの作成

本システムでは初めに、電波減衰マップを作成する。電波減衰マップとは、部屋のどの位置にどれくらいの大さの障害物があるのか、またその障害物の BLE 電波減衰率を登録したマップのことである。電波減衰マップの一例を以下の図 4.8 に示す。青色の矩形が部屋であり、灰色が障害物のある箇所である。灰色の濃淡は障害物の減衰率の高低を表している。本システムのユーザは、予め部屋の各障害物の位置、大きさ及び種類を登録しておく。各障害物の登録画面を以下の図 4.9 に示す。そして、次項以降で述べるシステムにおいてそのデータを利用し、位置推定を行う。

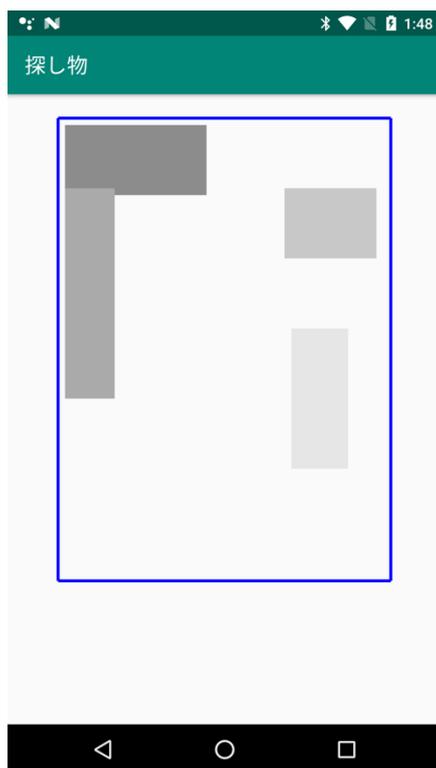


図 4.8 電波減衰マップの一例

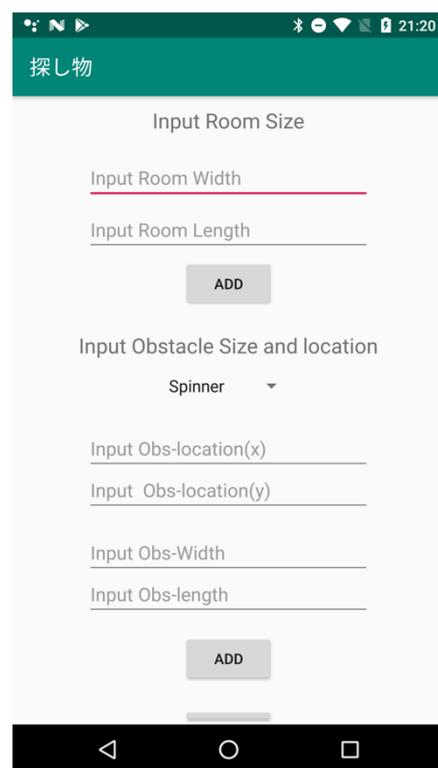


図 4.9 障害物の入力画面

## 4.5.2 障害物を考慮した位置推定のアルゴリズム

本システムにおける位置推定アルゴリズムのフローチャートを以下の図 4.10 に示す。

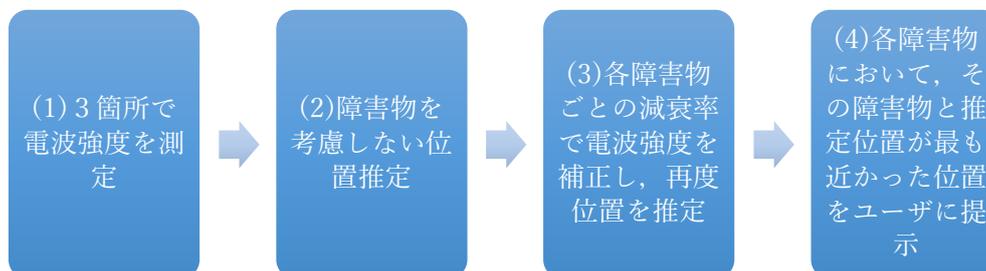


図 4.10 位置推定アルゴリズムのフローチャート

### (1) 3箇所電波強度を測定

初めに、異なる3箇所における電波強度を測定する。そしてその結果を元に、各位置からの距離を算出する。

### (2) 障害物を考慮しない位置測定

(1)の結果を元に、4.4.2項で述べた手法で障害物を考慮しない位置測定を行う。

### (3) 各障害物の減衰率で電波強度を補正し、再度位置を推定

次に電波減衰マップに登録されている障害物の1つ1つについて、その減衰率から電波強度を補正する。補正のための式は以下の式 4.4 を用いる。ただし補正前の電波強度を  $RSSI$ 、補正後の電波強度を  $RSSI_{obs}$ 、障害物の減衰率を  $A_{obs}$  とした。

$$RSSI_{obs} = (1 - A_{obs})RSSI \quad (4.4)$$

式 4.4 で得られた補正後の電波強度を用いて、再度位置推定を行う。そして得られた推定位置とその障害物との距離を記録する(このデータを障害物減衰データと呼ぶ)。

### (4) 各障害物において、その障害物と推定位置が最も近かった位置をユーザに提示

(3)で得られた障害物減衰データが最も小さいものが、位置測定したいものの位置であると判定し、その位置をユーザに提示する。

## 5 章 位置測定実験

本項では、本研究において行なった実験の概要と結果について述べる。

### 5.1 実験の概要

#### 5.1.1 実験環境

本研究では、個人が自室で探し物をするユーザというシナリオに基づいているため、実験環境には個人が普段利用する大きさ程度の部屋を想定し、6.6m×4.7mの部屋を利用した。また、測定機器としてはNexus6を利用し、BLEデバイスとしてはCC2650STK SimpleLink Sensor Tagを用いた。

#### 5.1.2 実験方法

電波強度を測定する3箇所は、より正確な誤差を測定するために固定とした。3箇所の測定位置を以下の図5.1に示す。

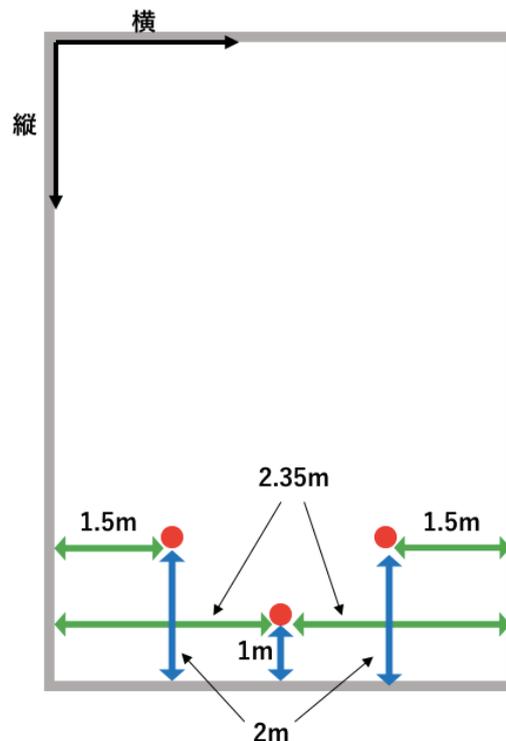


図 5.1 測定する 3 箇所

実験を行う BLE デバイスの設置箇所は 10 箇所(順に A~J とする)用意した. そのうち 5 箇所は計測機器と BLE デバイスの間に障害物が存在しない場所(グループ 1 とする), そして残りの 5 箇所は障害物の中, 下及び奥 (グループ 2 とする) とした. 以下の図 5.2, 図 5.3 に設置した箇所の写真を示す.



図 5.2 グループ 1 の BLE デバイス設置箇所 (左から順に机大の中央(A), 机小の上(B), 棚の中(C), 机大の端(D), 椅子の上(E))



図 5.3 グループ 2 の BLE デバイス設置箇所(左から順に机大の上の鞆の中(F), クッションの下(G), 机大の上のコートの中(H), 毛布の下(I), 本棚の奥(J))

各計測箇所で 100 回電波強度を測定し, その平均値をその箇所での電波強度として 4 章で述べたシステムを利用して位置推定を行い, 実際の BLE デバイスの位置と推定位置の間の誤差を調査した.

## 5.2 実験結果

障害物を考慮しないシステムの計測結果及び障害物を考慮したシステムの計測結果は, 以下の表 5.1, 5.2, 5.3 のようになった. ただし, 縦横の表記はそれぞれ図 5.2 の座標軸に準拠するものとする.

グループ1(障害物考慮あり/なし)

		A	B	C	D	E
正しい位置[m]	横	2.35	4	0.4	2.8	0.43
	縦	2.2	1.7	5	2.3	2.2
推定位置[m]	横	2.35	2.73	0.31	3.8	2.39
	縦	3.88	3.91	2.45	3.26	3.75
<b>誤差[m]</b>		<b>1.68</b>	<b>2.55</b>	<b>2.55</b>	<b>1.39</b>	<b>2.50</b>

表 5.1 グループ1の障害物考慮あり/なしの測定結果

グループ2(障害物考慮なし)

		F	G	H	I	J
正しい位置[m]	横	2.2	0.7	2.35	1	0.1
	縦	3.1	0.7	2.9	1.7	4.6
推定位置[m]	横	1.43	3.29	2.36	1.56	1.72
	縦	2.96	3.8	3.91	2.96	2.79
<b>誤差[m]</b>		<b>0.78</b>	<b>4.04</b>	<b>1.01</b>	<b>1.38</b>	<b>2.43</b>

表 5.2 グループ2の障害物考慮なしの計測結果

グループ2(障害物考慮あり)

		F	G	H	I	J
正しい位置[m]	横	2.2	0.7	2.35	1	0.1
	縦	3.1	0.7	2.9	1.7	4.6
推定位置[m]	横	1.08	2.41	2.04	1.53	2.19
	縦	3.15	2.23	3.86	2.7	3.86
<b>誤差[m]</b>		<b>1.12</b>	<b>2.29</b>	<b>1.01</b>	<b>1.13</b>	<b>2.22</b>

表 5.3 グループ2の障害物考慮ありの計測結果

また、障害物を考慮しないシステム及び、障害物を考慮したシステムそれぞれの誤差の平均値及びその分散については、以下の表 5.4 のようになった。

	平均[m]	分散
障害物考慮なし	2.03	0.85
障害物考慮あり	1.84	0.37

表 5.4 誤差の平均値及び分散

## 6章 評価実験

本章では、個人が探し物をする際に、どの程度の誤差のある位置情報ならば有用と感じるのか、また5章の実験で得られた誤差のある位置情報が、個人が自室で探し物をする際に有用と言えるかどうかを調査するために行った評価実験の概要及び結果について述べる。

### 6.1 評価実験の概要

#### 6.1.1 被験者の内訳

実験は、20歳から24歳の15名を対象に行った。被験者の性別の内訳は男性が14名、女性が1名であり、被験者の平均年齢は22.4歳である。

#### 6.1.2 事前調査

本実験では、探している物の「重要性」と物を探す場面の「緊急性」を尺度として設定した。「重要性が高い物」とは、探す物が被験者にとってなくすと困る、なくてはならないと感じる物のことで、「緊急性が高い場面」とは、探し物をなるべく早く見つけたいと感じる場面のことである。この「重要性」と「緊急性」を尺度として設定し、それらが探し物をする際にどのような影響を与えるのかを調査した。

個人がどのような物を重要と考え、どのような場面を緊急であると考えてかには個人差があるため、事前にそれらを調査した。具体的には、以下の表6.1のように物と場面ごとに5つのシナリオを用意し、事前に各被験者に対して、物のシナリオについては「1番なくすと困る物」、「最もなくしても困らない物」、「3番目になくすと困る物」、場面のシナリオについては「最も探し物を早く見つけたい場面」、「最も時間をかけて探し物をできる場面」、「3番目に探し物を早く見つけたい場面」の6項目をアンケート形式で回答してもらった。また回答したそれぞれの物や場面について、「日常生活においてその物を探すこと、その場面で物を探すことがどれくらいあるのか」を「よくある」、「しばしばある」、「あまりない」、「ほとんどない」、「全くない」の5段階で回答してもらった。

物のシナリオ	場面のシナリオ
財布	仕事のため外出する直前
鍵	友人との約束のため外出する直前
スマートフォン	家でくつろいでいる時
エアコンのリモコン	朝起きた直後
腕時計	寝る直前

表 6.1 物及び場面のシナリオ

### 6.1.3 本実験

事前調査で得られた物及び場面での系 6 シナリオ毎に誤差 3m, 2.5m, 2m, 1.5m, 1m のそれぞれの位置情報が与えられた時に、その情報が「役に立たない」、「どちらかと言えば役に立たない」、「どちらかと言えば役に立つ」、「役に立つ」のどれに当てはまるかを調査した。実験には 4.7m×6.6m の部屋を使用した。誤差ごとにその位置情報が部屋のどれくらいを占めるのかを視覚的に明示し、その範囲内に探し物があるという情報が探し物をする際に役に立つかどうかを回答してもらった。

4 章で示した本研究におけるシステムの誤差は、得られた位置情報からその誤差を半径とする円上のどこかに物が存在するということであるから、ある誤差  $r[m]$  が与えられた時に、物が存在する可能性がある範囲の面積は  $\pi r^2[m^2]$  と表される。各誤差における実際の物がある範囲の面積は以下の表 6.2 に示す。また、各誤差における物が存在する可能性のある面積と、実験に用いた部屋の範囲の対応を以下の表 6.3 に示す。

誤差	物が存在する可能性のある範囲の面積
3m	$28.6m^2$
2.5m	$19.6m^2$
2m	$12.6m^2$
1.5m	$7.07m^2$
1m	$3.14m^2$

表 6.2 誤差と物が存在する可能性のある範囲の面積の対応表

誤差	部屋全体の面積に対する割合
3m	92.3%(ほぼ部屋の全域)
2.5m	63.2%(部屋の約 2/3)
2m	40.6%(部屋の約 2/5)
1.5m	22.8%(部屋の約 1/4)
1m	10.1%(部屋の約 1/10)

表 6.3 誤差と実験に使用した部屋の面積の対応表

## 6.2 実験結果

### 6.2.1 各誤差の重要性についての結果

事前調査で回答してもらった重要性ごとの各誤差における有用性の調査の結果は以下の図 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 のようになった。ただし以下の図では簡単のため、「1 番なくすと困る物」、「最もなくしても困らない物」「3 番目になくすと困る物」，をそれぞれ「重要性 1 位」，「重要性 5 位」，「重要性 3 位」と表記し，「最も探し物を早く見つけたい場面」，「最も時間をかけて探し物をできる場面」，「3 番目に探し物を早く見つけたい場面」を「緊急性 1 位」，「緊急性 5 位」，「緊急性 3 位」と表記した。

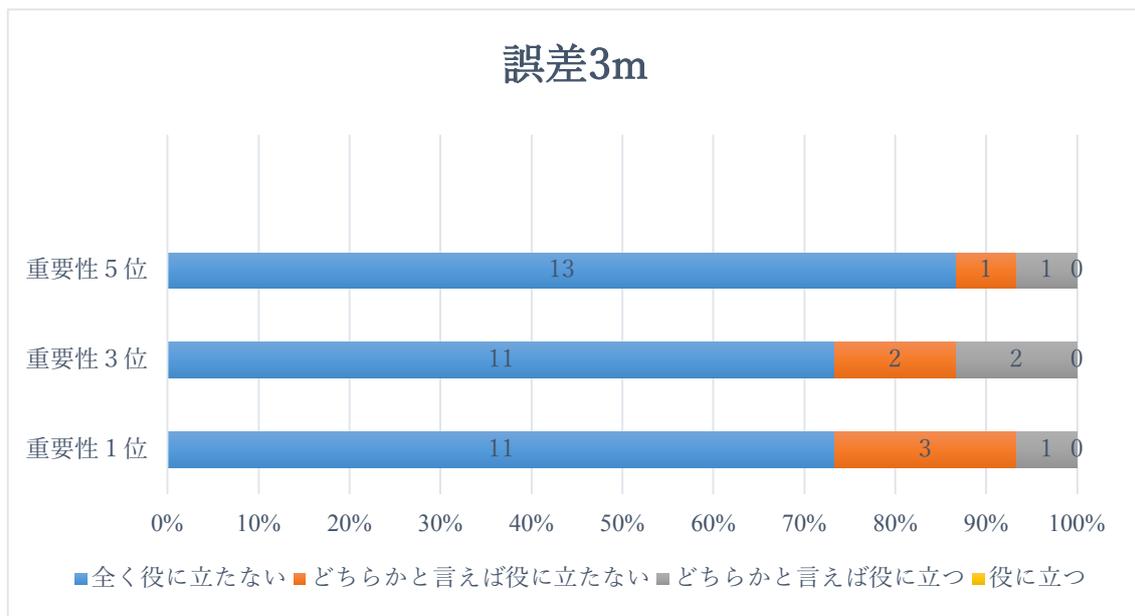


図 6.1 誤差 3m における重要性ごとの調査結果

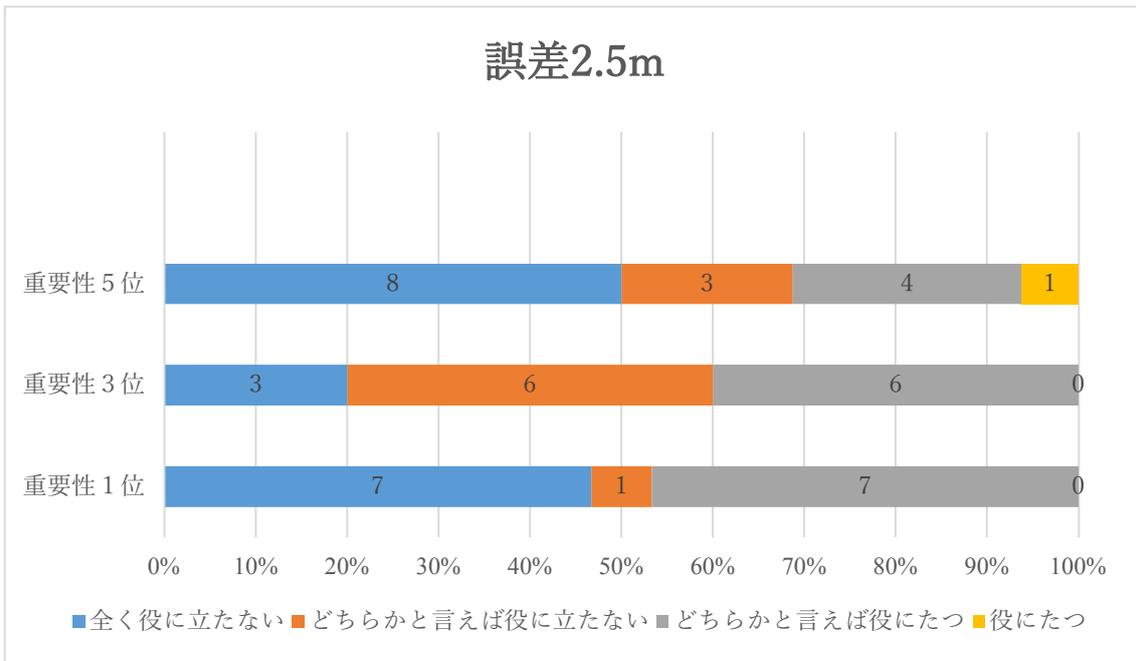


図 6.2 誤差 2.5m における重要性ごとの調査結果

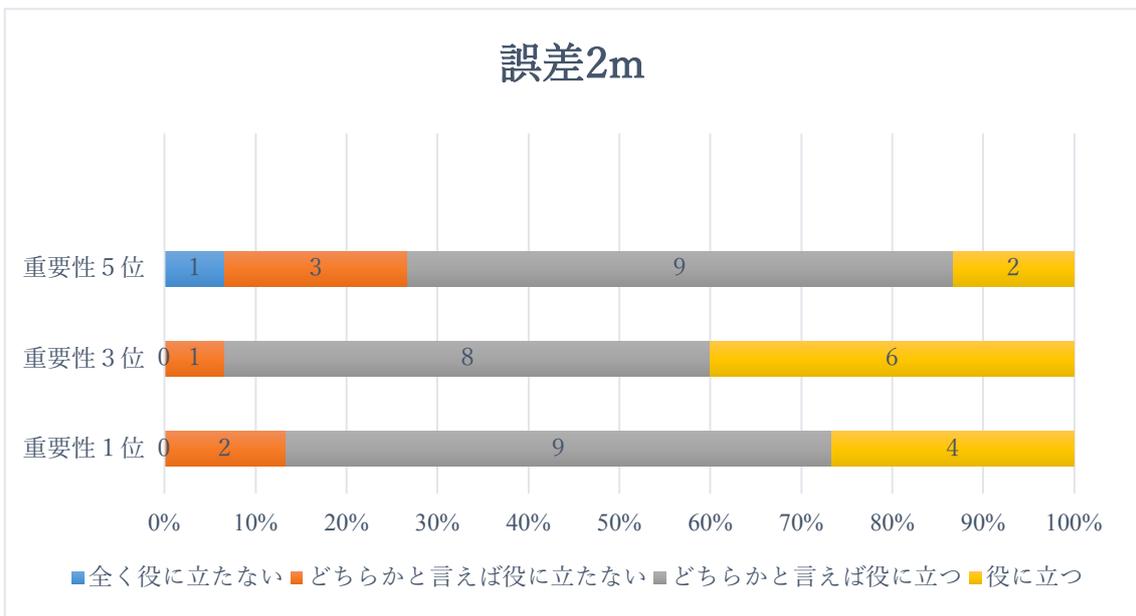


図 6.3 誤差 2m における重要性ごとの調査結果

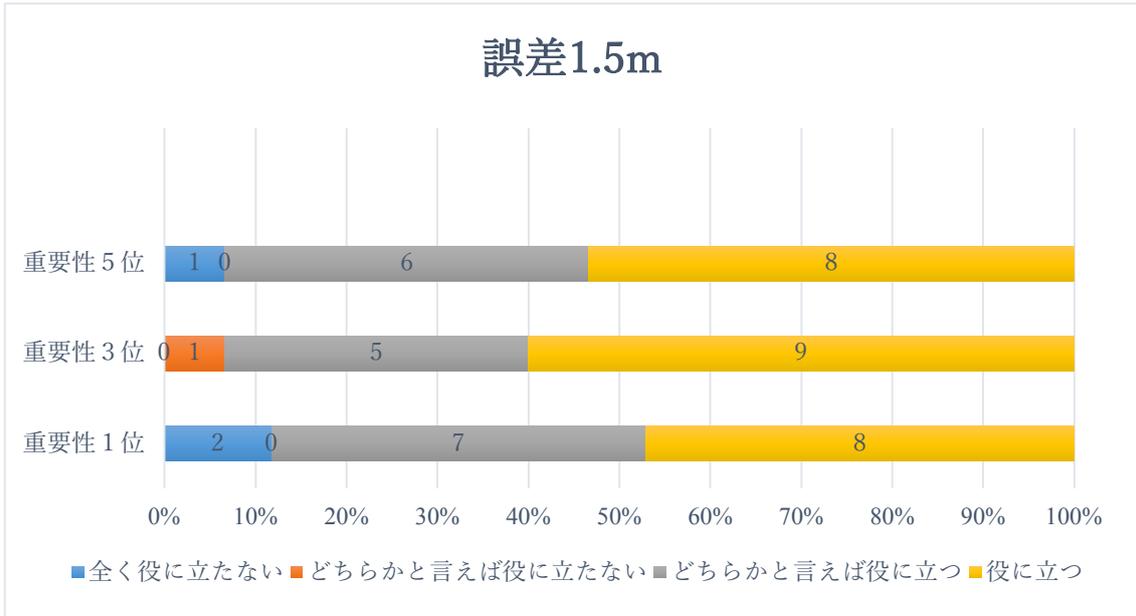


図 6.4 誤差 1.5m における重要性ごとの調査結果

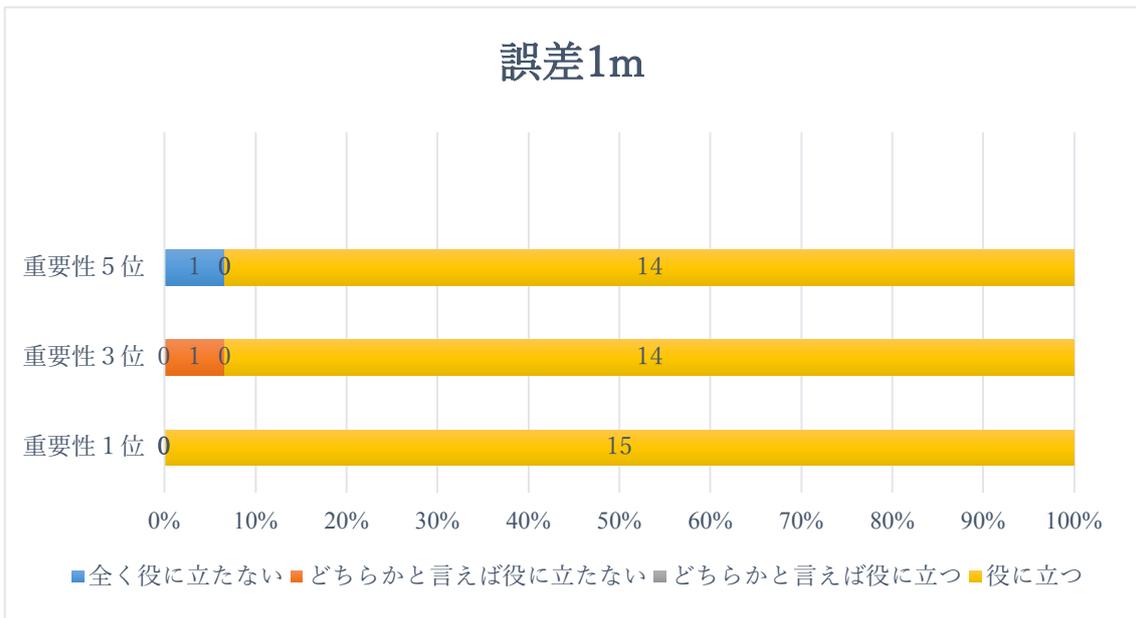


図 6.5 誤差 1m における重要性ごとの調査結果

次に緊急性ごとの各誤差における有用性の調査の結果は以下の図 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 のようになった。

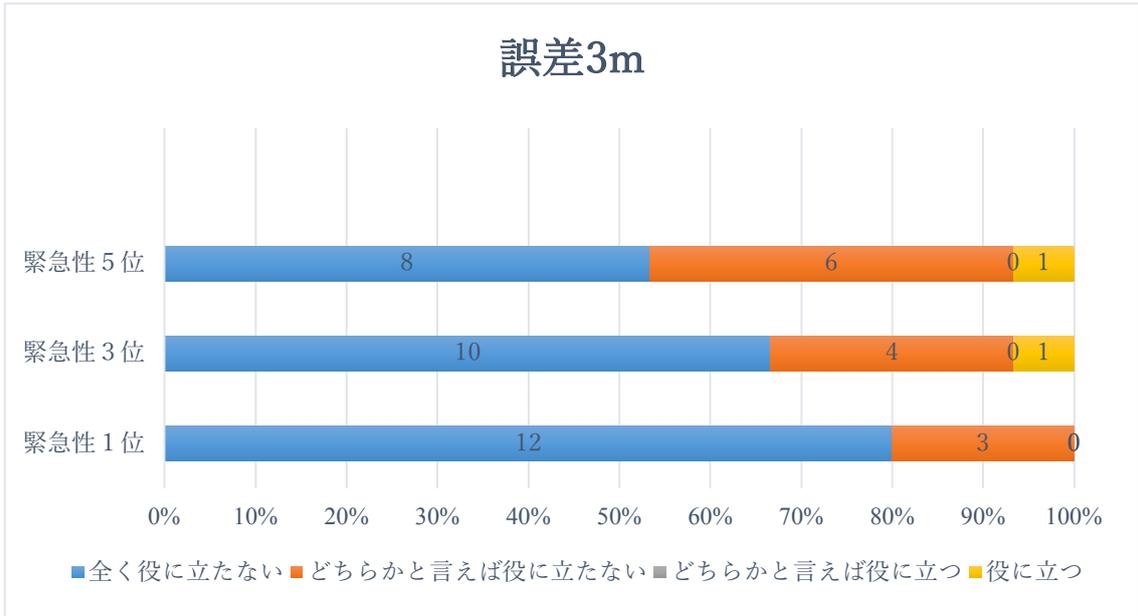


図 6.6 誤差 3m における緊急性ごとの調査結果

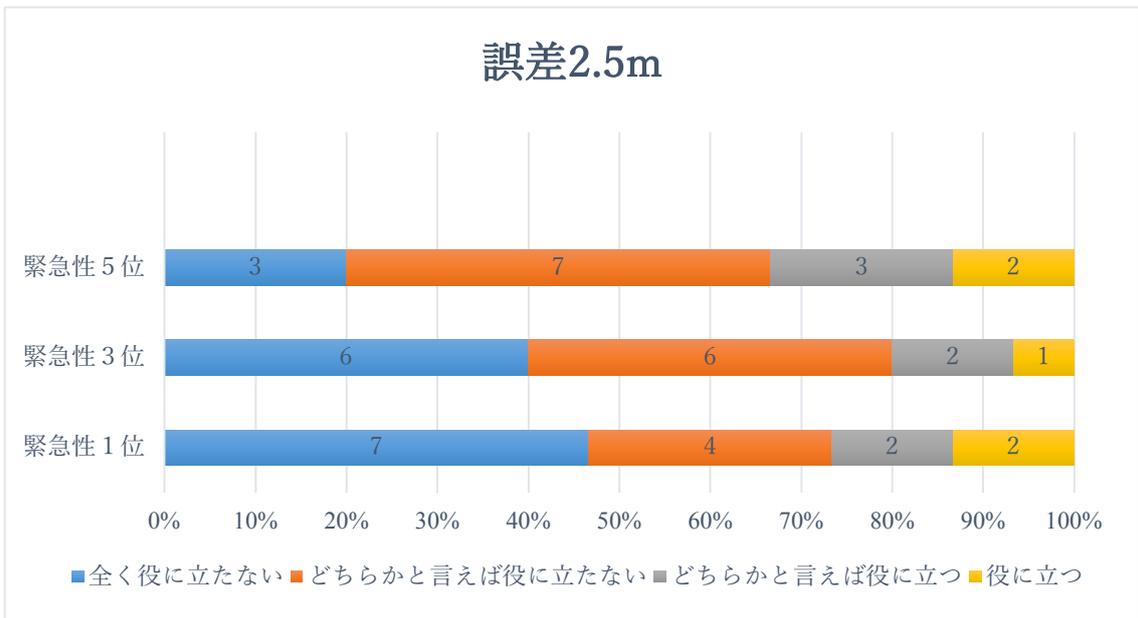


図 6.7 誤差 2.5m における緊急性ごとの調査結果

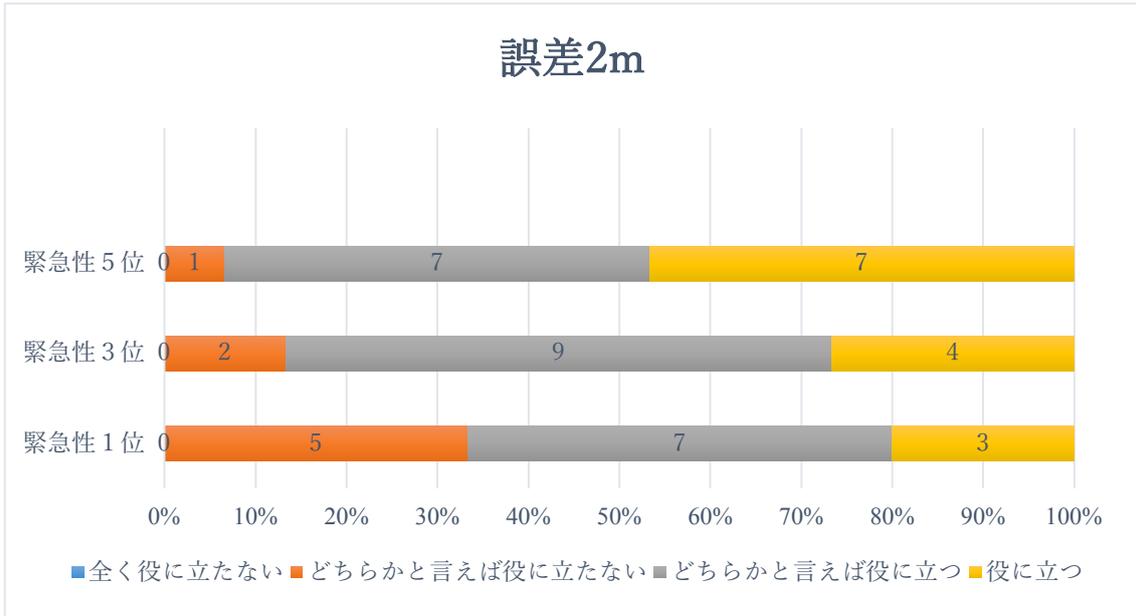


図 6.8 誤差 2m における緊急性ごとの調査結果

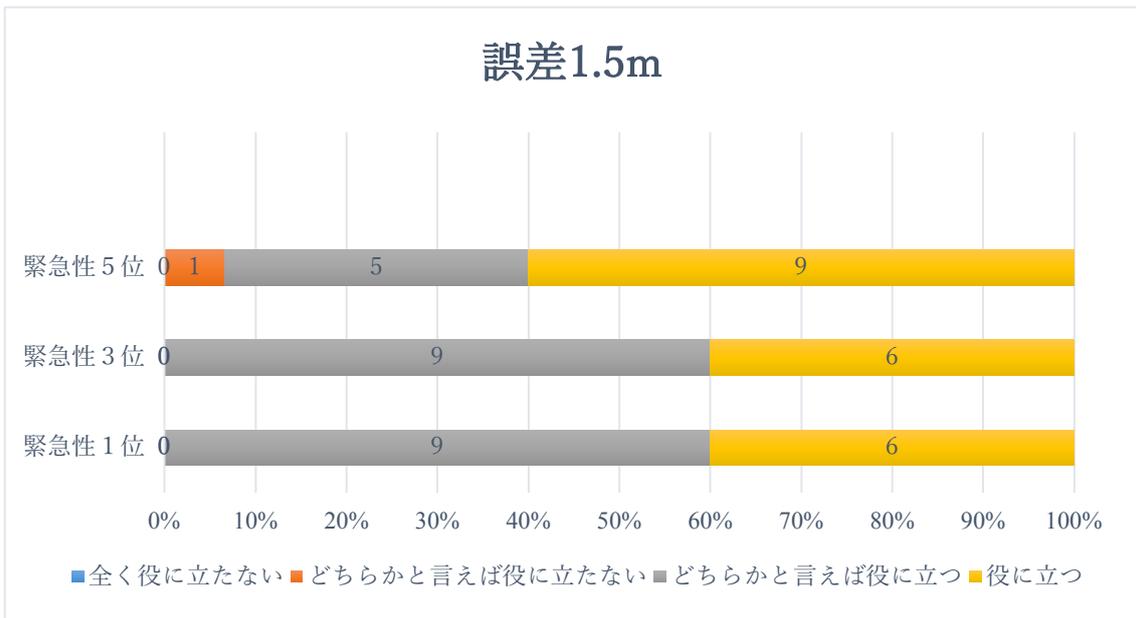


図 6.9 誤差 1.5m における緊急性ごとの調査結果

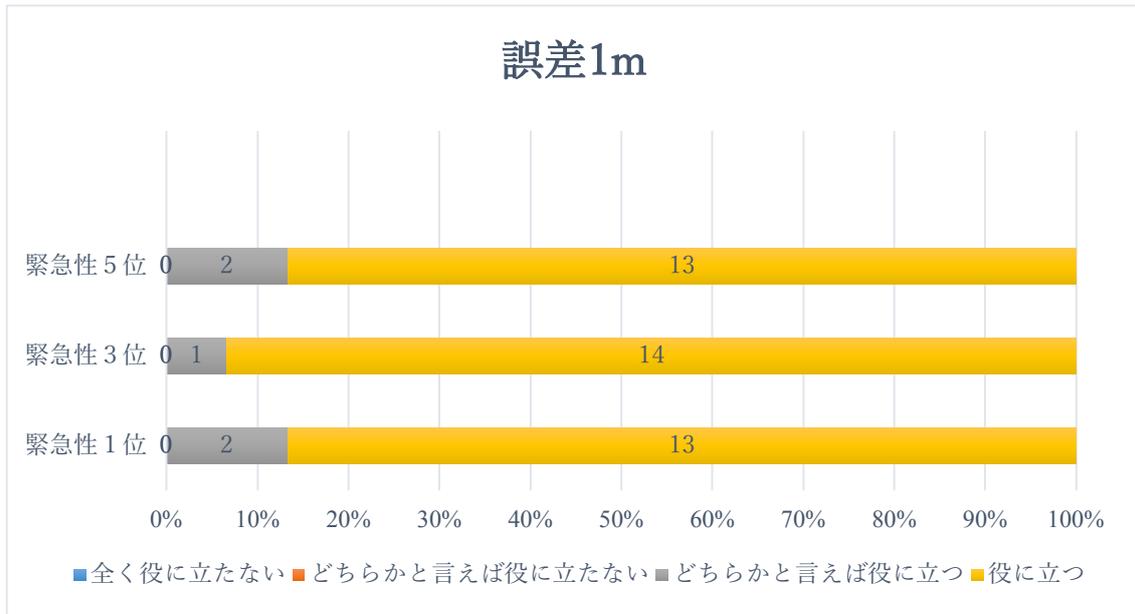


図 6.10 誤差 1m における緊急性ごとの調査結果

次に、日常的にその物を探す頻度やその場面で探し物をする頻度と、有用だと感じるかどうかの関係性の結果を以下の図 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 に示す。事前調査の頻度の項目にて「全くない」「ほとんどない」が選択されたものに対しては「低頻度」とし、「あまりない」が選択されたものに対しては「中頻度」とし、「しばしばある」, 「よくある」が選択されたものに対しては「高頻度」とした。

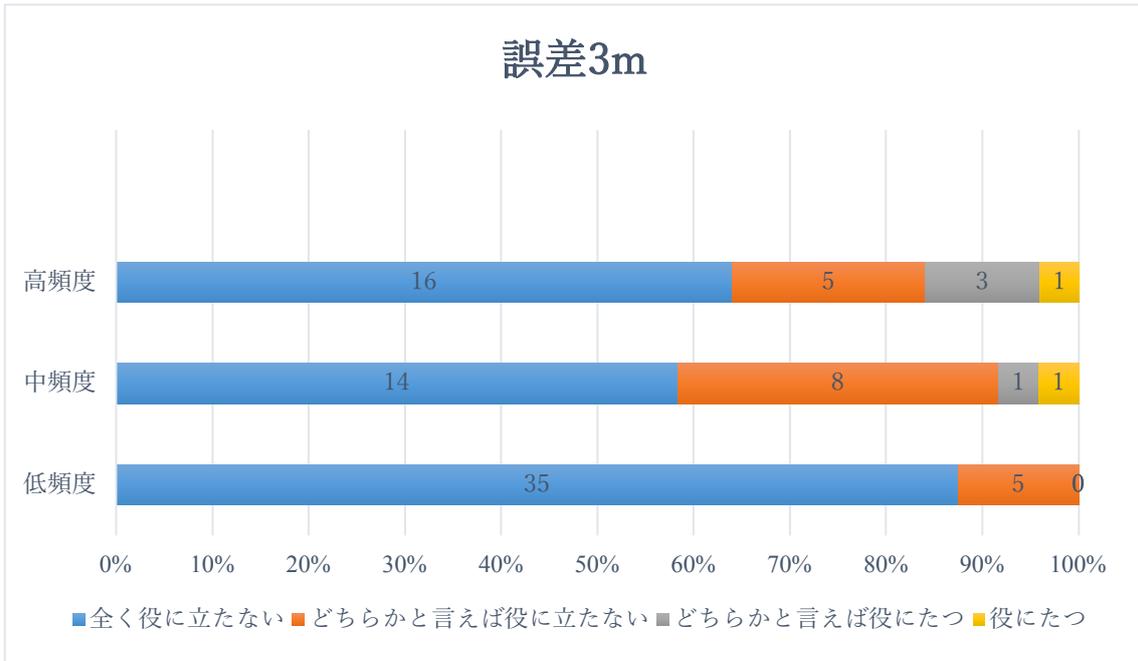


図 6.11 誤差 3m における頻度ごとの有用性の調査結果

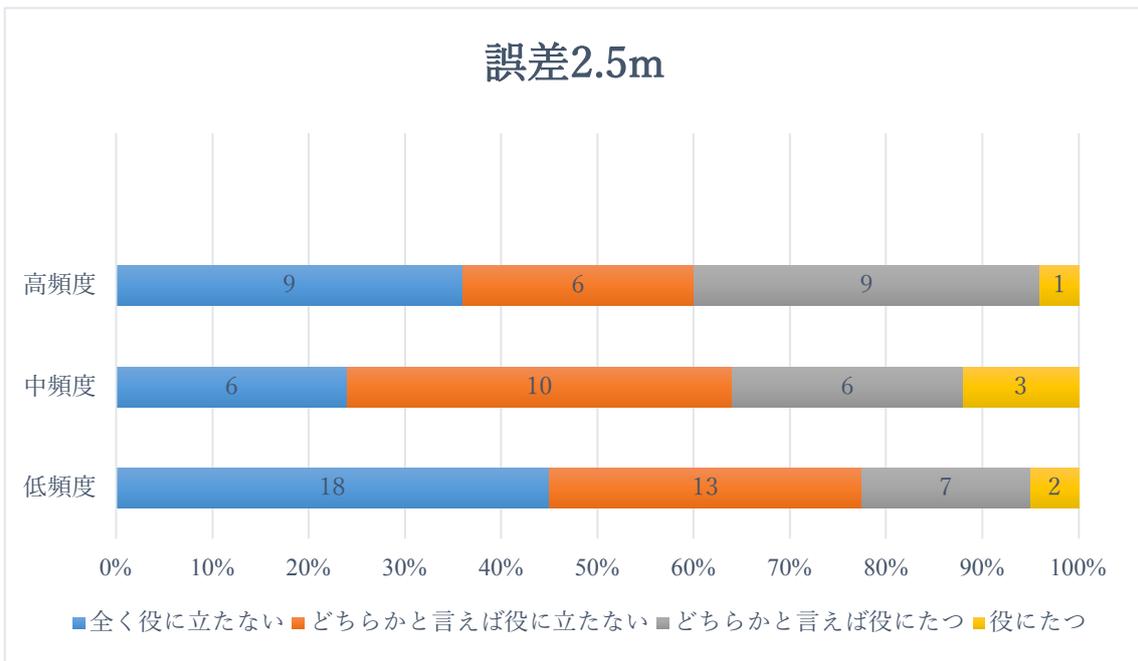


図 6.12 誤差 2.5m における頻度ごとの有用性の調査結果

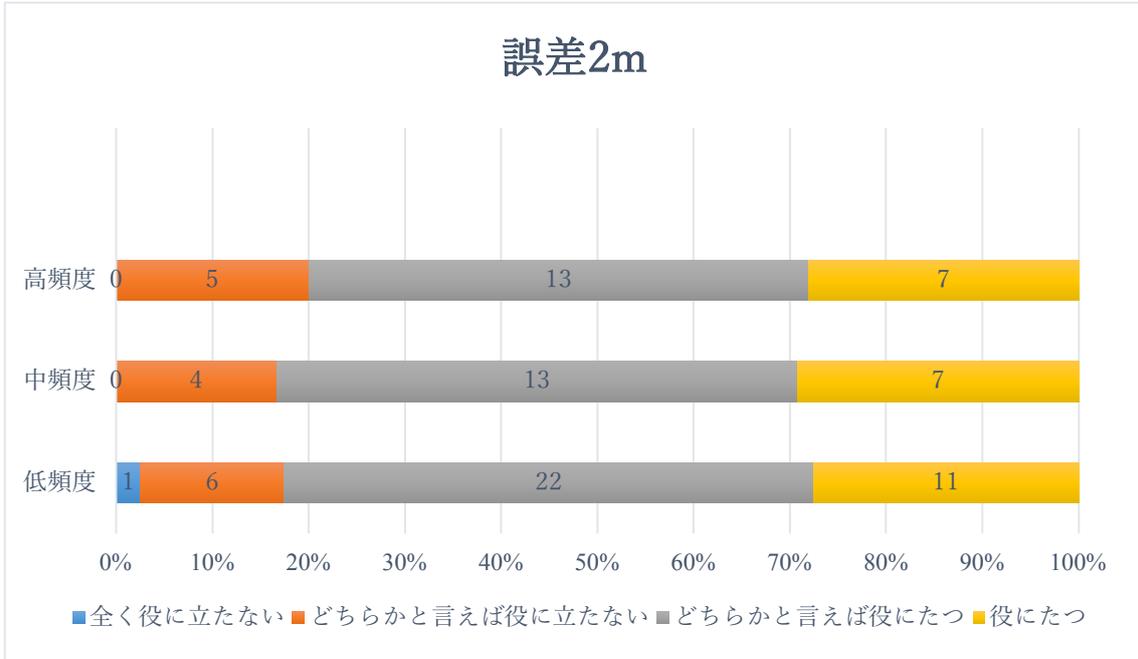


図 6.13 誤差 2m における頻度ごとの有用性の調査結果

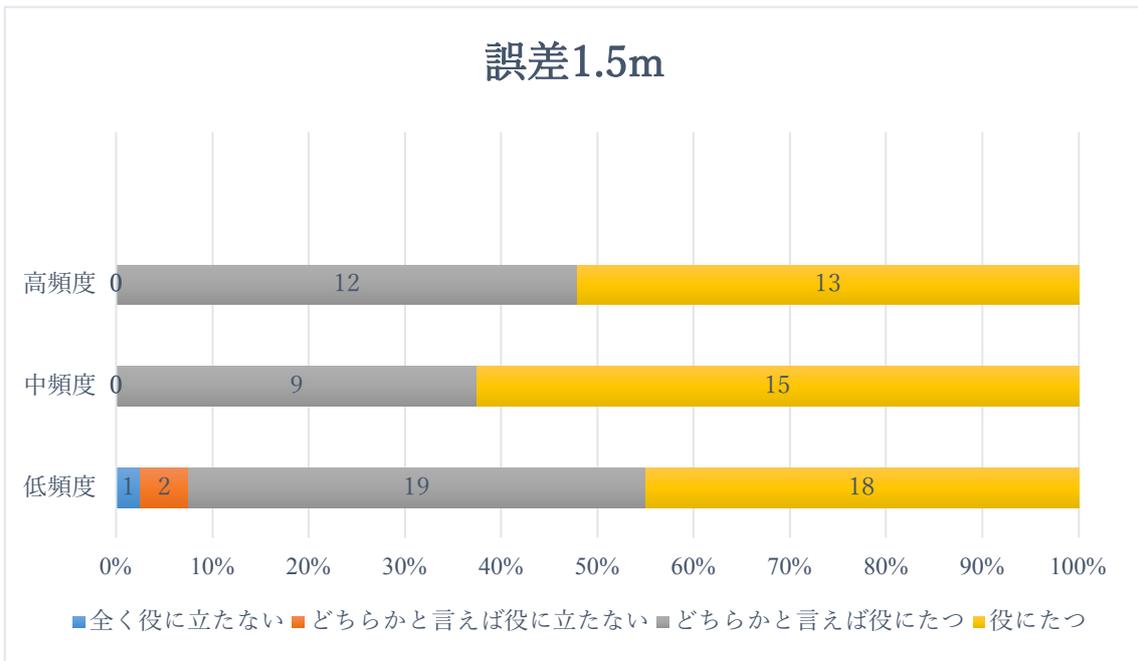


図 6.14 誤差 1.5m における頻度ごとの有用性の調査結果

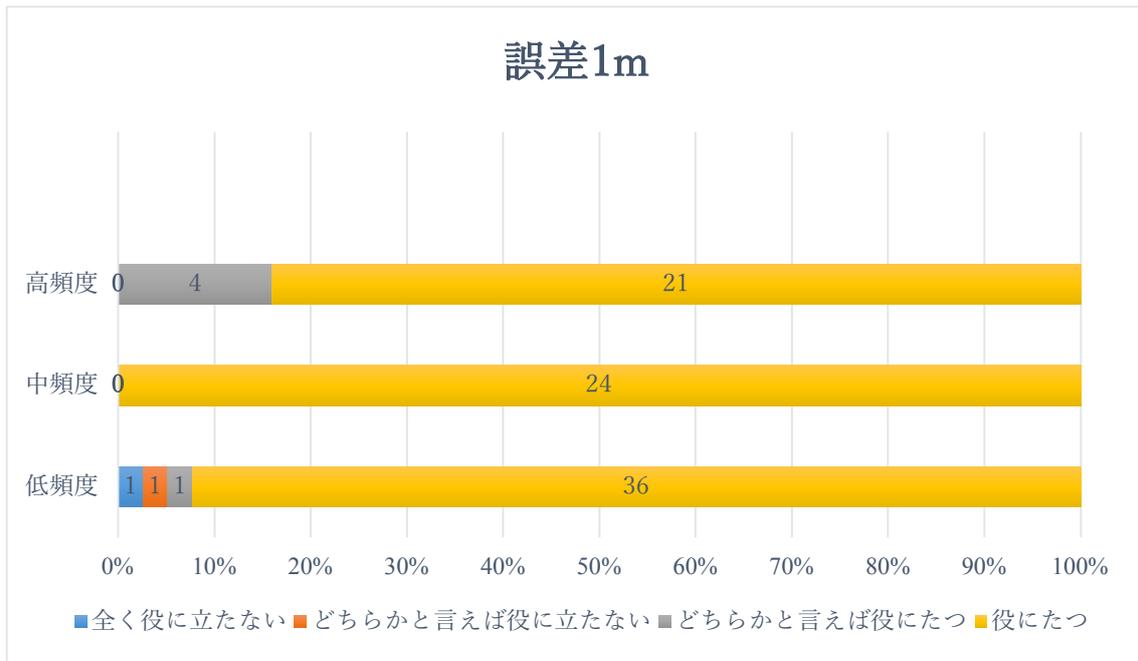


図 6.15 誤差 1m における頻度ごとの有用性の調査結果

## 7 章 考察

### 7.1 事前実験に関する考察

#### 7.1.1 様々な物質による減衰率調査に関する考察

3.1.3 項で得られた様々な物質による BLE 電波減衰の調査の結果について考察する。得られた結果としては、物質は BLE 電波の減衰率によって低減衰率のものと高減衰率のものの2つに大別できることがわかった。具体的にはプラスチック素材、木材、ゴム素材、紙素材の減衰率は数%~10%程度と低く、鏡面ガラス素材は 50%程度と高くなった。これまで明確に BLE 電波の減衰率を調査した研究がないことから、この調査自体には価値があると評価できる。一方で、様々な電波が飛び交う環境の中で環境の要因をすべて排除した測定を行うことは極めて難しく、今回行った測定の結果も厳密であるとは言い難い。また、身の回りにある様々な製品は単一の素材でできていることは珍しく、様々な材質の組み合わせでできていることを考えれば、この調査結果を応用することも難しい。

#### 7.1.2 日常的な障害物による減衰率調査に関する考察

3.2.2 項で得られた日常的な障害物による BLE 電波減衰の調査の結果について考察する。各障害物の減衰率の平均は概ね 20%~30%程度と、大きな差は出なかった。一方で、障害物と BLE デバイスの位置関係による減衰率の最小値と最大値の差分は違いが見られた。とりわけ、本棚の奥の場合の最小値と最大値の差分は 40%以上あった。その理由として考えられるのは、本棚の材質が金属であるということだ。金属は電波を 100%に近い割合で反射するので、周囲が金属に囲まれている状況にある BLE デバイスから出された電波は、様々な反射や回折、干渉等を経て計測機器に到達する。その到達までの道のりがデバイスの位置を変えるごとに大きく変化した結果が、このような大きな差分を生み出しているのではないかと考察する。

## 7.2 位置計測実験に関する考察

本研究で構築したシステムで異なる10箇所の位置計測を行った結果は、障害物を考慮しないシステムでの平均誤差は2.03m、誤差の中央値は2.06m、最小誤差は0.78m、最大誤差は4.04m、分散は0.85となった。また、障害物を考慮したシステムでの平均誤差は1.84m、誤差の中央値は1.95m、最小誤差は1.01m、最大誤差は2.55m、分散は0.37となった。両者の誤差値を比較すると、障害物を考慮することにより平均誤差は約10%精度が向上した他、最大誤差も大きく下がったことから、障害物を考慮することにより位置測定の精度が向上したと言える。また、Krizらの結果である最大誤差2.82m、平均誤差1.08mや、Chenらの結果である誤差の中央値1.5m、最大誤差3mと比較すると、ある程度の精度の悪化は認められるものの、測定までのフィンガープリントの収集や機械学習といった手間がかからないことを考慮すれば評価に値すると言える。

一方で、最小誤差と最大誤差の差が大きいことが問題としてあげられる。その差は具体的には、障害物を考慮しないシステムで3.26m、障害物を考慮したシステムで1.54mとなった。この理由として考えられる理由は大きく2つある。

1つ目の理由としてあげられるのは、反射や干渉などの影響だ。表5.1から表5.3の結果を見てみると、BLEデバイスを部屋の中央寄り(A, B, D, F, H, I)に設置した場合はそれらの平均誤差が障害物を考慮しないシステムで1.47m、障害物を考慮したシステムで1.48mなのに対し、BLEデバイスを壁沿い(C, E, G, J)に設置した場合はそれぞれ2.88m, 2.39mであった。つまり、壁等の反射の影響の少ない部屋の中央寄りにBLEデバイスがある場合は比較的正しい位置計測が行われている一方で、壁の近くにBLEデバイスがある場合は、計測機器に到達する電波が、壁等で反射したものと直接届いたもの(障害物により減衰されたもの)が混在し、精度の悪化を招いている可能性があると考えられる。

2つ目の理由としてあげられるのは、障害物の減衰率の幅である。表3.2で挙げたように、各障害物にはその障害物とBLEデバイスの位置関係によって、最大減衰率と最小減衰率に大きな幅がある。本システムではそれらの平均値を用いて位置計測を行ったが、その平均減衰率と最大減衰率あるいは最小減衰率との差分が誤差として現れている可能性があると考えられる。

## 7.3 評価実験に関する考察

### 7.3.1 位置計測実験の誤差と評価実験の結果に関する考察

各シナリオ及び誤差について、その誤差が有用だと思う人（どちらかと言えば役に立つ及び役に立つと回答した人）の割合を以下の表 7.1 に示す。

	誤差 3m	誤差 2.5m	誤差 2m	誤差 1.5m	誤差 1m
重要性 1 位	6.67%	46.7%	86.7%	86.7%	100%
重要性 3 位	13.3%	40.0%	93.3%	93.3%	93.3%
重要性 5 位	6.67%	31.3%	73.3%	93.3%	93.3%
緊急性 1 位	0.00%	26.7%	66.7%	100%	100%
緊急性 3 位	6.67%	20.0%	86.7%	100%	100%
緊急性 5 位	6.67%	33.3%	93.3%	93.3%	100%

表 7.1 各シナリオ及び誤差において有用だと感じた人の割合

この結果から、各誤差に以下の表 7.2 のことがわかる。

誤差	結果からわかること
3m	ほとんどの人が有用だと思わない
2.5m	3 割程度の人が有用だと思う
2m	8 割程度の人が有用だと思う
1.5m	ほとんどの人が有用だと思う
1m	ほとんどの人が有用だと思う

表 7.2 各誤差の結果からわかること

この表と本研究で得られた障害物を考慮した位置測定システムの平均誤差である 1.84m を比較すれば、本システムは平均して 8 割以上の人が探し物をする際に有用だと思う誤差の位置測定を行えるということがわかる。

### 7.3.2 重要性及び緊急性に関する考察

表 7.1 の誤差 2.5m と誤差 2m の結果を見ると、重要性については重要性が高いものの方が有用だと思える人が多い一方で、緊急性については緊急性が低いものの方が有用だと思える人が多かった。このことから、重要性が高いと感じるものを探している場合は、多少精度が荒くても何かしらの位置情報が欲しいと感じる傾向にある一方で、緊急性が高いと感じる場面で探し物をしている場合は、なるべく高精度の位置情報が欲しいと感じる傾向にあると言える。

### 7.3.3 頻度に関する考察

各頻度・誤差における有用だと思える人（どちらかと言えば役に立つ及び役に立つと回答した人）の割合を以下の表 7.3 に示す。

	誤差 3m	誤差 2.5m	誤差 2m	誤差 1.5m	誤差 1m
高頻度	16.0%	40.0%	80%	100%	100%
中頻度	8.33%	36.0%	83.3%	100%	100%
低頻度	0.00%	22.5%	82.5%	92.5%	94.9%

表 7.3 各頻度・誤差における有用だと思える人の割合

この結果から頻度が高いもの、つまり日常的によく探す物や探し物をする場面においては、多少精度が荒くとも何らかの位置情報が欲しいと感じる人の割合が高いということがわかる。一方で、頻度が低いもの、つまり日常的にあまり探さない物や探し物をしていない場面においては、より精度の高い位置情報を求める傾向があることがわかる。

## 7.4 日常生活を想定した本システムの有用性に関する考察

7.3 項で得られた結果・考察を用いて、日常生活における BLE デバイスを利用した位置測定の有用性についての考察を行う。

本研究で得られたシステムによる平均誤差 1.84m は、平均して約 8 割以上の人が見つし物をする際に役に立つと思うと回答したことから、日常生活において探し物をする際に本システムは有用であると言える。しかし、本システムで得られる位置測定誤差が常に 1.84m ではなく、当然探し物の位置や障害物の有無等によって変動する。以下の表 7.4 に、6 章の結果を元にして算出した測定誤差がどれくらいになるかの確率表を示す。

誤差の範囲	確率
1.5m 以下	40%
1.5m 以上 2.0m 未満	10%
2.0m 以上 2.5m 未満	20%
2.5m 以上	30%

表 7.4 誤差の範囲ごとの確率表

このように、過半数が有用だと思わない誤差である 2.5m 以上の誤差となる確率は 30% である。とりわけ、緊急性の高い場面での探し物をする際は個人が求める誤差はより小さいものとなっており、場面によっては本システムで得られた位置情報が役に立たないと思う場合もあると考えられる。

次に、各シナリオの日常生活における頻度との関係を以下の表 7.5 に示す。ただし、「全くない」、「ほとんどない」、「あまりない」、「しばしばある」、「よくある」をそれぞれ 1 点～5 点に点数化し、その平均を示した。

シナリオ	頻度の平均点数
重要性 1 位	3.2
重要性 3 位	1.87
重要性 5 位	2.67
緊急性 1 位	3.6
緊急性 3 位	1.87
緊急性 5 位	2.67

表 7.5 シナリオと頻度の平均点数の関係

これを見ると、日常生活で最も頻度が高いのは緊急性 1 位のシナリオである。これと表 7.1 の結果及び 7.3.2 の考察を合わせると、日常生活で最も頻度の高いシナリオである緊急性が高い場面においては、本システムは有用であるとは言い難い。一方で、次に頻度が高い重要性 1 位のシナリオについては、同様にして表 7.1 の結果及び 7.3.2 の考察を合わせれば、本システムは有用であると言える。

以上の考察から、日常生活においては、場面や探す物によって本システムの有用性は変化していることがわかる。すなわち、ある程度の誤差が許容されるような場面・シナリオにおいては本システムにおける位置測定システムは有用であると結論できる。

## 8 章 結論・将来課題

### 8.1 結論

3章の事前実験により、様々な物質及び日常的な障害物における BLE 電波の減衰率の調査を行い、これまで詳しい調査がされてこなかった物質及び障害物ごとの BLE 電波減衰率の一例を得ることができた。

また、5章の位置測定実験により、個人でも簡単に利用できるよう設計された本研究におけるシステムでの位置測定誤差を得ることができた。さらにこの結果と6章の評価実験の結果を比較・検討することで、本研究におけるシステムの誤差の有用性に加えて、個人がどのような物・場面にてどの程度の誤差の位置情報を有用だと感じるのかを明らかにすることができた。

### 8.2 将来課題

#### 8.2.1 より多くの減衰率調査の必要性

本研究により、事前に調査した障害物の電波減衰率の値を用いることにより、位置測定の精度が10%程度向上した。しかし事前調査を行っていない、つまり減衰率が未知の障害物に対してはこの手法を適用することができない。より多くの日常的な障害物における減衰率の調査結果があれば、本研究におけるシステムのさらなる汎用性が期待できるだろう。

#### 8.2.2 精度のさらなる向上の必要性

本研究におけるシステムで得られる位置情報の平均誤差は1.84mであり、評価実験の結果と比較した結果、8割以上の人々が有用だと思える誤差だということがわかった。しかし、確かに平均誤差の値は有用であるとわかったが、5章の結果を見ると3割程度の人しか有用だと感じない誤差である2.5mを超える誤差となった測定箇所もいくつか存在する。この結果を鑑みれば、平均誤差の値だけでなく誤差の最大値の低減の必要性があると言える。

## 参考文献

- [1] Frank Van Graas, Michael Braasch “GPS Interferometric Attitude and Heading Determination: Initial Flight Test Results.” *Journal of institute of navigation* Volume 38, Issue 4(1991): pp297-316.
- [2] Nomusa Dlodlo, Paul Mbecke, Mofolo Mofolo, Martin Mhlanga “The Internet of Things in Community Safety and Crime Prevention for South Africa.” *Innovations and Advances in Computing, Informatics, Systems Sciences, Networking and Engineering*(2014): pp531-537.
- [3] Xuyu Wang, Lingjun Gao, Shiwen Mao “BiLoc: Bi-Modal Deep Learning for Indoor Localization With Commodity 5GHz WiFi.” *IEEE Access* Volume5(2017): pp4209-4220.
- [4] Joydeep Biswas, Manuela veloso “WiFi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots.” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010.
- [5] Moustafa Abbas, Moustafa Elhamshary, Hamada Rizk, Marwan Torki, Moustafa Youssef “WiDeep: WiFi-based Accurate and Robust Indoor Localization System using Deep Learning.” *IEEE PerCom*, 2019.
- [6] Rob Matheson “Robots track moving objects with unprecedented precision” Available: <http://news.mit.edu/2019/robots-track-moving-objects-unprecedented-precision-0219>[accessed on 2020/01/17].
- [7] Filippo Palumbo, Paolo Barsocchi, Stefano Chessa, Juan Carlos Augusto, “A stigmergic approach to indoor localization using Bluetooth Low Energy beacons.” *IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance(AVSS)*, 2015.
- [8] Prajakta S. Chavan, Uttam L. Bombale, “Design and Implementation of Anti Lost Bluetooth Low Energy Mobile Device for Mobile Phone.” *Journal of Engineering Research and Application* Vol.4, Issue 5(2014): pp73-76.
- [9] Pavel Kriz, Filip Maly, and Tomas Kozel, “Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons.”, *Journal of Mobile Information Systems* Volume 2016,2016.

- [10] Adel Thaljaoui, Thierry Val, Nejah Nasri, Damien Brulin, “BLE localization using RSSI measurements and iRingLA”, IEEE international Conference on Industrial Technolofy(ICIT), 2015.
- [11] Dongyao Chen, Kang G. Shin, Yurong Jiang, Kyu-Han Kim, “Locating and Tracking BLE Beacons with Smartphones”, International Conference on emerging Networking Experiments and Technologies(CoNEXT), 2017.
- [12] 横野 泰和, “材料中の超音波の減衰の測定”, 溶接学会誌 62 卷 7 号(1993): pp522-527.

## 謝辞

本研究を行うにあたり、丁寧かつ的確なご指導を賜りました中島達夫教授に心より感謝をいたします。また、評価実験に参加してくださった先輩・同輩・後輩諸氏に感謝いたします。