

東京大学大学院新領域創成科学研究科

社会文化環境学専攻

2017 年度

修 士 論 文

LPWAN を用いた森林環境における位置推定

Localization in forest environment using LPWAN

2017 年 1 月 22 日提出

指導教員 瀬崎 薫 教授

梅 沢 啓 佑

Keisuke, Umezawa



# 目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 本論文の構成.....	1
第 2 章 研究背景.....	
2.1 自然環境モニタリングの現状.....	3
2.2 課題の解決を試みた手法とその問題点.....	6
2.3 LPWAN.....	7
2.3.1 LPWANの種類と特徴.....	7
2.3.2 LoRaWAN.....	8
第 3 章 LPWAN を用いたワンホップ転送位置情報付与システムの提案.....	10
3.1 提案システムの概要.....	10
3.2 LoRa を用いた基地局の役割.....	11
3.3 位置推定手法.....	12
3.3.1 繰り返し最小 2 乗法.....	12
3.3.2 測地座標系から ECEF 座標系へ.....	14
3.3.3 ECEF 系から地平直交座標へ.....	15
3.3.4 RSSI の減衰モデル作成.....	16
第 4 章 実験と結果.....	18
4.1 実験の概要.....	18
4.2 実験場所.....	18
4.3 実験機材.....	19
4.4 実験方法.....	21
4.5 結果と考察.....	22
5.5.1 Anchor 毎の RSSI のバラつき.....	22
5.5.2 Anchor 毎のフィッティング.....	23
4.6 位置推定.....	24
4.6.1 ー手法 1ー.....	26
4.6.2 結果と考察.....	31

4.6.3	—手法 2—	32
4.6.4	結果と考察	34
4.7	有効範囲と限界	35
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>36</b>
5.1	本研究のまとめ	36
5.2	今後の展望	37
	謝辞	38
	発表文献	40
	参考文献	41
	付録	45

# 図目次

図 2.1 通信サービスエリア (KDDI) .....	3
図 2.2 遭難者・負傷者・死亡者の推移.....	4
図 2.3 福島県における避難者指示区域の概念図 (平成 28 年度) .....	5
図 2.4 DTN を用いた動物間マルチホップ転送システムの概念図.....	6
図 2.5 LoRa の通信規格の概念図.....	9
図 2.6 Class A のタイムスロット.....	9
図 3.1 提案システムの概念図 .....	10
図 3.2 電波減衰の概念図.....	11
図 3.3 RSSI の距離毎の実測値と理論値.....	12
図 3.4 グローバルポジショニングからローカルポジショニングへの変換方法.....	14
図 3.5 ECEF 系と測地座標系の概念図.....	15
図 3.6 ECEF 座標から地平直交座標変換の概念図.....	16
図 4.1 実験場所.....	18
図 4.2 実際に使用した機材.....	19
図 4.3 実験風景.....	19
図 4.4 実験場所と Anchor の設置場所.....	21
図 4.5 各 LoRa の実測値.....	22
図 4.6 各実測値とモデルの比較.....	23
図 4.7 区分けした 4 つのエリア.....	25
図 4.8 LoRa Anchor の設置方法.....	25
図 4.9 手法 1 の概念図.....	26
図 4.10 Anchor4 ~ 6 に対するエリア別平均誤差.....	30
図 4.11 Anchor7 ~ 9 に対するエリア別平均誤差.....	31
図 4.12 Anchor10 ~ 12 に対するエリア別平均誤差.....	32
図 4.13 Anchor13 ~ 15 に対するエリア別平均誤差.....	33
図 4.14 手法 1 におけるエリア別平均誤差.....	31
図 4.15 手法 2 の概念図 .....	32
図 4.16 手法 2 におけるエリア別平均誤差.....	34
図 4.17 LoRa の理想的な設置箇所.....	37

# 表目次

表 2.1 LPWAN 規格の特徴比較.....	8
表 4.1 LoRa のデータレート.....	20
表 4.2 LoRa の送信出力と消費電力の関係.....	20
表 4.3 Anchor 毎の寄与率 (決定係数) .....	24
表 4.4 手法 1 におけるエリア別平均推定誤差.....	31
表 4.5 手法 2 におけるエリア別平均推定誤差.....	34
表 A.1 各 Anchor 毎のフリスの公式のパラメータ .....	45



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 はじめに

近年、モバイル端末の急速な発展を皮切りに、身の回りの情報をモバイル端末や IoT 機器などを用いて簡単にセンシング出来るようになった。これは単に人の動きや生活習慣などを可視化できるようになっただけでなく、動物の生態系や自然環境をモニタリングする技術にも応用できる可能性を示唆している。なぜなら、センシングデバイスが年々小型化・高性能化しているため、自然環境に負荷を与えることなく、例えば動物が人間の代わりに自然環境をセンシングすることが可能だと考えられるのである。実際にそのような研究は存在し[5], 人が介在することなく森林環境や動物の生態系をセンシングすることで人と動物は共存していくことができると考えられている。

また、2011 年 3 月 11 日起きた東日本大震災から 7 年経つが、この原発事故によって人が立ち入ることが出来ないレベルの放射線量が検出されている地域が、未だ存在する[1]。これらの地域では人が立ち入ることが出来ないため、自然の生態系や動物の生態系を外から知ることは難しい。

本研究は、動物感通信を用いた環境センシングは、人が介在することなく動物同士で環境センシングを行うことを可能にする研究であるが、これらのデータには位置情報を付与する必要がある。そこで、本研究では LPWAN の一種である LoRa を用いて位置推定を試みた。具体的には古典的な測位手法で、GPS などで用いられるマルチラテレーションを用いて、LoRa の RSSI からの強度を利用して位置を推定した。この方法が確立されれば、全自動で動物がセンシングしたデータに位置情報を付与することが出来るため、自然環境や生態系を深く知ることに非常に役に立つと。

### 1.2 本論文の構成

本論文は、以下のような構成である。

第 1 章「序論」では本研究をおこなうにあたっての全体の概要と研究の意義について述べる。



第 2 章「研究背景」では本研究における研究の背景について、現状の課題とそれに対するアプローチを紹介した後、改善点について述べる。

第 3 章「関連研究」では後述する LoRa に関連する先行研究について述べ、その問題点と解決策を提案する。

第 4 章「RSSI を用いた位置推定の概要」では実際に本研究で扱った手法について詳しく述べる。

第 5 章「実験と評価」では実際に秩父演習林にて行った実験の結果をまとめ、考察を述べる。

第 6 章「結論」では 5 章により得られた結果についてまとめた後、今後の展望や可能性について述べる。

## 第 2 章

# 研究背景

本章では研究背景として自然環境モニタリングに関する現状と課題を述べた後、解決を試みた例についてまとめる。また、本研究で用いた LPWAN の一種である LoRa について、その概要と特徴を示す。

### 2.1 自然環境モニタリングの現状

都市部では通信網が発達しており、電波の入らない場所は存在しないくらい私たちはこの恩恵を享受し、当たり前のも物と認識している。しかしながら、例えば図 2.1 の白い部分は通信インフラが存在しない箇所になっており、人がこのような場所に出向いて実地調査を行うことは様々なコストが掛かることが容易に想像できる。時間的なコストから、自然の生態系を壊してしまうコストや人件費のコストなど、様々なコストがかかる。

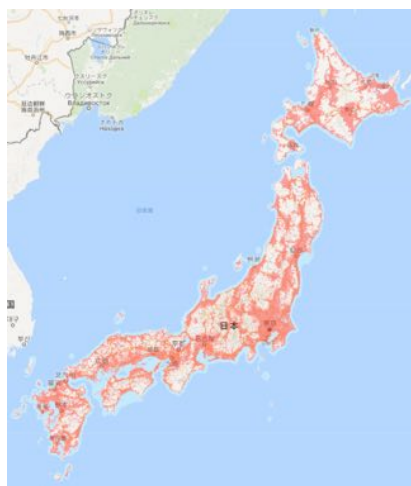


図 2. 1 通信サービスエリア (KDDI) <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> 図は AU の通信サービスエリア[2]より引用

2015年時点で日本の国土の約70%は森林環境となっており、通信圏外の地域は未だ多く存在するため、日本では未だ多くの部分が通信圏外になっている。そのため、これらの地域でセンシングしたデータを通信網を通してアップロードするには課題が伴う。また、警察庁生活安全局地域課が出している平成28年の山岳地域における遭難の状況によれば、2,495件の遭難が発生し、そのうち死者・行方不明になった人は319人、負傷者は1133人だった[図2.2]。遭難発生状況は増減を繰り返しているが、平成25年以降から発生件数は2000件以上を推移しており、平成19年と比較すると以下のようになっており、遭難者は年々増加している[3]。



図 2.2 遭難者・負傷者・死亡者の推移<sup>2</sup>

遭難者の目的別で見ると71.7%が登山であり、その38.1%が道迷いであった。

通話手段の使用状況を見てみると、携帯電話やアマチュア無線が76.4%であったが、通話エリア内のみ有効であることを警察庁は述べている。

以上のように、山岳地域においては、通信圏内であれば救助を呼ぶことが出来るが、その外側になってしまうと救助を呼ぶことが出来ない。またこれらの地域ではGPSが上手く入らない箇所も多く、そのせいで道迷いに陥る可能性が高いと考えられる。

実際、道迷いだけでなく、作業中の事故なども起きている。代表的な調査中の事故はサハリンでの死亡事故[24]が挙げられる。高山植物に関する調査を行っていた際、垂れ下がっていた高電圧線に調査員があやまって触れてしまい、感電死した。また日本生態学会の野外調査時の安全マニュアルに載っているように、野外調査中にハチや毒蛇、ヒグマに遭遇する可能性も十分に存在するため[4]。私達が普段生活している都心部では想像がつかないような様々な事故が、山岳地域でおこるのが特別なことではないと言える。

また、2011年3月11日、福島第一原発で事故が起きたことは私達の記憶に古くない。

<sup>2</sup> 図は警察庁生活安全局地域課、「平成28年度における山岳遭難の概況」から引用[3]

[illegible]

## 2.2 課題の解決を試みた手法とその問題点

Nakagawa et al. (2014)は, Delay Tolerant Networking, 遅延耐性ネットワーク技術を利用した, 動物間マルチホップ転送システム (Carrier Pigeon-Like Sensing System 以下 CPSS) を提案した[5]. CPSSはDTNを利用したシステムであり, そのシステムの中身は主に3つの要素から構成される. 「センシング」「データ共有」「どうぶつタッチ&ゴー」である. 「センシング」では, 動物が背負っているセンサモジュールを利用して, 自動的にセンシングを行う. 「データ共有」では, センシングデバイスを背負った動物同士が遭遇することで, 互いのデータを通信によって更新を行う. 具体的には, 動物は互いにであった際, 特有の行動をする. 例えば犬であれば, 互いのニオイを嗅ぎ合う行動を行う. これらの行為が行われたのをトリガーに, 動物同士がセンシングしたデータの共有が始まる. こうすることで広い範囲の土地においても, 複数の動物同士が情報の転送を行うことで, 大規模ネットワークを構築し, エリアのカバーを行うことが出来る. 「どうぶつタッチ&ゴー」では, 通信インフラが整った通信基地局に動物をおびき寄せることで, 転送されたデータ全てをアップロードする仕組みである. 動物はそのタイプに寄って様々な習性を持っている. そのため, 例えば小林ら(2012)[4]は, イリオモテヤマネコのおびき寄せにはネコジャラシ指向の情報刺激を提示することで, イリオモテヤマネコのおびき寄せに成功している. このCPSSは通信環境が劣悪な地帯においても, 多数の中継地点, ここでは動物同士がデータを交換し続けることで, 人が介在することなく, センシングしたデータを人間の手元まで送り届けることが出来ると考えられている.

また, 牧山らはこのシステムの犬同士の出会いの際の判定アルゴリズムを考案した[6]. 具体的には, 人間の行動検知に使われるアルゴリズムを動物にも用いることで, より高い精度で動物のすれ違いを検知することを可能とした.

ただし, これら2つの研究結果はあくまで犬に限定した結果であり, 他の動物同士のすれ違いを検出するには今後も検証を行う必要があると述べている.

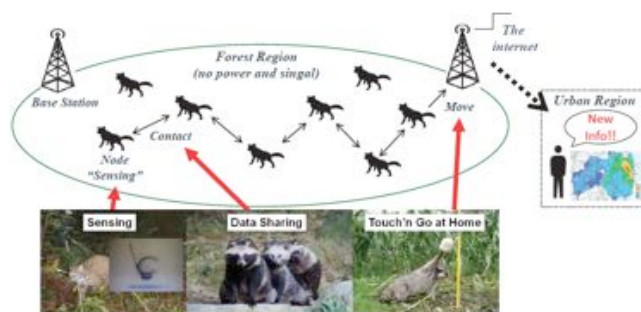


図 2. 4 DTN を用いた動物間マルチホップ転送システムの概念図<sup>4</sup>

<sup>4</sup> 中川ら[5]の論文の図から引用

## 既存手法の課題とその解決方法

中川ら、牧山らが提案した手法の未解決な点としては、センシングされたデータの位置情報が付与されていない点が挙げられる。位置情報はセンシングされたデータは位置情報と対になって初めて意味を成すと考えられるため、位置を付与するのは必須とも言える。

### 航空音を利用した自動自己位置推定の研究

合間らは、森林環境において自己位置推定を行うため、航空機の音を利用して位置推定を試みた。具体的には、東京大学秩父演習林にてマイクで音を録音し、その録音データから機械学習で学習機を作成した。航空音を自動で分類する際、SVM と呼ばれる手法を用いて分類を行った[7]。SVM は教師あり学習の代表的なモデルであり、マージン最大化と呼ばれる概念を利用して分類を行う。また、音を分類する際にメル周波数ケプストラム係数（以下 MFCC）を用いて、録音された音から特徴量を抽出する手法を用いて精度向上を試みた。しかしながら、分類器自体の精度評価を ROC 曲線を用いて評価した所、その結果は分類精度が 100% になってしまい、明らかに過学習であることがわかる。原因としては航空音を機械学習にかけるとは大量の教師データが必要になるが、サンプル数が 500 とあまり多くなかったことや、そもそも MFCC 処理は音声処理に使われる手法であるため、航空音の分類には向いていなかったことなどが挙げられる。

また、中川らが提案したこの手法は動物同士がすれ違う事を前提としている。しかしながら、山間部において動物同士が長期間すれ違わない可能性も存在し、そのような状況ではデータの更新率は下がり、人間の手に共有されるデータの総量は減ってしまう。

そこで本研究では、後述する LPWAN を用いて、新たなシステムの提案を行うことでこれら 2 つの課題を同時に解決する手法の提案を行う。

## ・ 2.3 LPWAN

LPWAN とは、Low Power Wide Area Network の総称で、省電力で長距離にパケットを送信・受信することができる通信規格のことを指す[]。通信距離は規格にもよるが、見通しがあつた場合は数キロ程度とかなり遠くまで飛ぶ。しかしながら、Wi-Fi や Bluetooth などにくらべ通信速度は遅い。そのため、IoT など、比較的データ容量の小さいデータを送信・受信することに適した次世代小型省電力通信モジュールとして、用いることが想定されている。

### ・ 2.3.1 LPWAN の種類と特徴

LPWAN の中で、代表的な規格は主に LoRaWAN, SIGFOX, NB-IoT の 3 つである。3 者の仕様の比較を下記に示す[8]。表 2.1 より 3 者にはそれぞれ小さな違いはあるものの、共通の特徴として通信範囲がとても広い点が上げられる。最も遠くまで通信ができる SIGFOX では通信範囲が見通し

があった場合 50km, 最も通信範囲の狭い NB-IoT でも 5km と, その通信範囲は広い. SIGFOX, LoRaWAN に関しては所謂サブギガヘルツ帯と呼ばれる通信帯域を利用しているため, 日本の電波法によりライセンス申請無しで通信を行うことができるため, 独自のネットワークを構築できる. そのため, 屋外でセンシングしたデータを送信するのに役に立つと考えられている.

表 2.1 LPWAN 規格の特徴比較<sup>5</sup>

	SIGFOX	LoRaWAN	NB-IoT
周波数帯	920Mhz	920Mhz	携帯電話と同じ
通信範囲	最大 50km 程度	最大 20km 程度	最大 5km 程度
通信速度	100bps (上り)	3kbps (上り)	62kbps
電池寿命	数年 ~ 10 年以上	数年 ~ 10 年以上	数年 ~ 10 年以上
セキュリティ	16bit	32bit	128~256bit

LoRaWAN は後述する 3 つの通信クラスを持っており, 使用用途に寄ってこのクラスを使い分けることで効率よくデータを送信する仕組みを持っている. 一方で, SIGFOX は Uplink のみの通信しか行えない, NB-IoT はセルラーを利用した通信である. 各 LPWAN の種類によって通信の仕組みがかなり異なる. しかしながら, 共通してゲートウェイを通信の中心におくスター型ネットワークを構築することで, そのカバーエリアを拡大にすることを狙っている. NB-IoT はライセンスが必要なため個人で扱うことは出来ないが, SIGFOX や LoRaWAN は個人で扱うことが出来るため, そのモジュールが販売されるようになりはじめた[36]. 日本においては唯一ソラコムが SigFox で LPWAN のネットワーク構築サービスを展開しているが, 日本において LPWAN を用いたサービスの展開は一般的ではなく, NB-IoT においてはまだ企業の導入も始まっていない. 一方でヨーロッパを中心に, 米国などでは LPWAN を用いたサービスが始まっているため, 研究の多くはヨーロッパの物が, 今のところ主流となっている[20], [21], [22], [23]

### • 2.3.2 LoRaWAN

LPWAN の中の 1 つの規格である LoRaWAN は Semtech 社によって開発された無線規格の 1 つで, 世界規模で LoRa Alliance と呼ばれる仕様で規格が厳密に策定されている[35].

通常 LoRaWAN といえば, 以下の図が示すように mac 層の LoRaWAN と物理層の LoRa を指す[9]. LoRaWAN は図 2.5 の通り, 3 種類のクラスを持っており, このクラスの選択によって通信のタイミングを切り替えることができる. Class A ではデバイス側からの通信が主になっており, Uplink から通信を開始する(図 2.6). デバイス側がデータをサーバーにアップロードした後, 今度はサーバー側からデバイス側に通信を開始する.

<sup>5</sup>東京エレクトロトデバイス株式会社から引用[5]

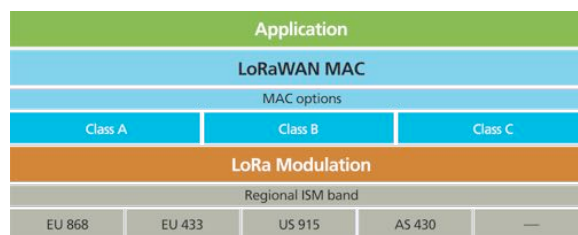


図 2.5 LoRa の通信規格の概念図<sup>6</sup>

このとき、デバイス側は RX1 と RX2 という 2 つのスロットを持ち、サーバー側からの応答を待つ。一方で、Class B ではサーバー側からの通信を行い、Class A に比べてやや長い受信時間を設けている。Class C では常にデータの受信スロットを開放している。LoRaWAN の規格では用途に応じて全体の Class を設定することで課題を解決することができると考えられている。

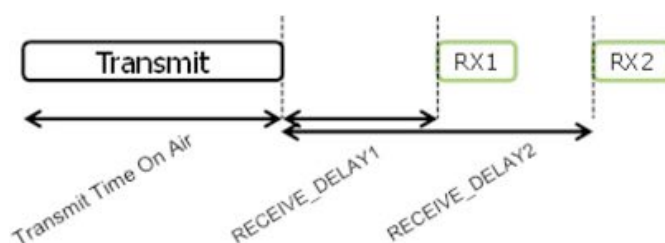


図 2.6 Class A のタイムスロット<sup>7</sup>

また、図 2.5 のから、LoRa は物理層の電波の変調方式を指し LoRa 変調と呼ばれるスペクトラム拡散によってパケットを遠くまで飛ばすことが出来る。LoRa 変調の特徴として **Spreading Factor** (拡散率) が存在する。このレートは 7 ~ 12 倍まで設定することが出来、より大きな拡散率にすればするほど、その分長距離に信号を飛ばすことが出来る。一方で、全体としてのスループットは下がる。使用できる通信帯域は 125kHz, 250kHz, 500kHz の 3 種類存在し、使用する帯域と拡散率でデータレートは自動的に決まる。

本研究ではこの LPWAN の 1 種である LoRa を用いて、先行研究の課題を解決する。具体的には中川らが提案したマルチホップ転送システムを拡張した、ワンホップ転送位置情報付与システムを提案する。

<sup>6</sup> Semtech 社のホームページより引用[9]

<sup>7</sup> N. Sornin らの論文から引用[10]



## 第 3 章

# LPWAN を用いたワンホップ転送位置情報付与システムの提案

本章では先行研究の課題となっていた、位置情報データが欠損していること、動物同士がすれ違わないことで起こるデータが交換されない問題を解決するため、ワンホップ転送位置情報付与システムの提案を行う。

### ・ 3.1 提案システムの概要

第 2 章で触れたように、先行研究の課題として、動物がセンシングしたデータに位置情報が付与されていないこと、また、動物同士がすれ違わない場合にはデータを伝達できない欠陥を、本システムによって改善する。

図 3.1 は、本提案システムの概念図である。第 2 章で述べたように、本提案システムには LPWAN の一種である LoRa を用いた。一般的に、LPWAN は通信範囲が非常に広いため、遠くまで電波を飛ばすことができる。

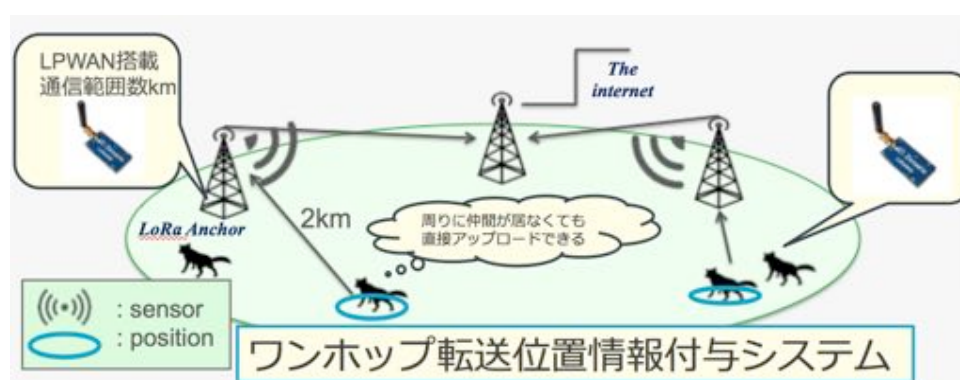


図 3.1 提案システムの概念図

そこで、動物が受信した LPWAN の信号の強さから、動物の位置を同定する。また、その広範囲な通信から、動物同士がすれ違わずとも、受信側と送信側が通信圏内に入れば、LPWAN を介して直接データをアップロードすることができる。また、LPWAN は省電力であるため、長期間森林環境に設置をしてもほとんど充電が不要な点がこのシステムの特徴である。

### ・ 3.2 LoRa を用いた基地局の役割

図 3.1 のシステムの概念図から、LoRa を搭載した基地局(ここでは LoRa Anchor)の役割を説明する。森林内に接地されたこの LoRa Anchor は、2 つの役割を持つ。1 つは、LoRa Anchor から発信された電波を動物が受信することで、位置を推定するためである。受信した電波から位置を推定するためには、電波の強さと距離の関係が分かっていると推定することが出来ない。一般的には、図 3.2 のように、電波は距離に関しては反比例していくので、距離が開ければ開くほど、その信号強度は減衰していくことが広く知られている。

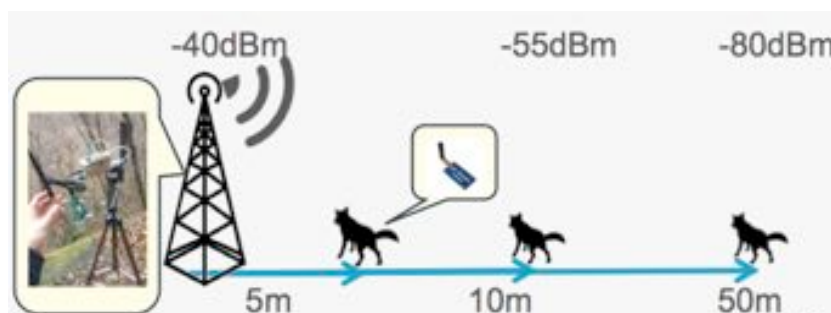


図 3.2 電波減衰の概念図

距離と信号強度の関係は Log Distance Model により以下の様に定式化されることが広く知られている[16].

$$y = A_0 - 10n \log_{10} d \quad (4.13)$$

$A_0$  は 1m あたりの RSSI の値を示し、 $n$  はパスロス変数と呼ばれ、一般に 2~6 程度の値を取る。理想的な自由伝搬空間においては  $n = 2$  として計算することが出来る。通常は 1m おきに RSSI を測定し、地点毎の RSSI をグラフにプロットした後、上記の公式を元に最小 2 乗法を用いて、パラメータ  $n$  を決める。以下の表 4.2 は実際の実測値と公式により理想的な減衰曲線との 8m までの減衰の比較である[8].

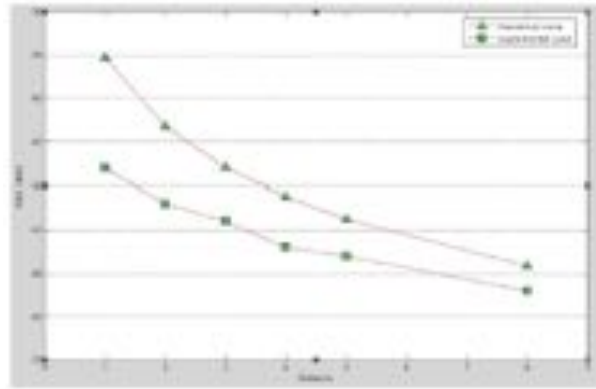


図 3.3 RSSI の距離毎の実測値と理論値<sup>8</sup>

RSSI と距離の関係を求めることで、動物が受信した LoRa Anchor の信号強度から実測した距離を求めることが出来る。

LoRa Anchor の 2 つ目の役割は、動物がセンシングしたデータを直接アップロードするために存在する。既存システムでは、どれか 1 個体を通信インフラが存在する場所までおびき寄せる「タッチ&ゴー」システムで採用していた。そこで、本システムでは 1 個体に限らず、LoRa の通信圏内にある動物のデータを送信することができる。

### ・ 3.3 位置推定手法

本章では RSSI を用いて位置推定を行う場合の手順を詳しくまとめる。RSSI を用いた位置推定を行う場合、前章で説明したように RSSI と距離の関係が必要になる。RSSI と距離の関係が求まれば、そこから位置推定を行うことができる。本研究では位置推定において古典的手法である繰り返し最小 2 乗法を用いて位置推定を行った。そのため、はじめに繰り返し最小 2 乗法概念とその計算手法をこの章で説明する。

#### ・ 3.3.1 繰り返し最小 2 乗法（マルチラテレーション）

位置推定を行うにあたって、古典的手法である繰り返し最小 2 乗法を用いて推定を行った[15]。一般に  $n$  個の既知の位置を用いて、求めたい地点の推定を行う。既知の地点から未知の地点までの実測された距離は必ず誤差を含んでいる、そのため、この誤差を最小にするよう、繰り返し計算を行うことで正確な位置を求めることができる。Anchor の設場所を既知の位置とし、その

<sup>8</sup> K. Pahlavan らの論文から引用[16]

座標を  $(x_i, y_i, z_i)$  と置き ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 求めたい推定位置の初期位置を適当に  $(x_0, y_0, z_0)$  と置き, それらの実測した距離を実測値  $R_i$  と置くと, 実測値と推定値の誤差  $\Delta R_i$  は式 4.15 のように表現できる [15].

$$\Delta R_i = R_i - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} + s_0 \quad (4.14)$$

$\Delta R_i$  は擬似距離と呼ばれ, 未知数の数だけ方程式が存在すれば解析的に解くことができる. しかしながら, 実際にはこの擬似距離には誤差が含まれるため解けない. そこでニュートン法がよく使われる [15]. 求めるべき推定位置の座標を  $(x_p, y_p, z_p)$  とおき, 初期値を  $(x_0, y_0, z_0)$  その修正和を  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , とおけば擬似距離と実際に測定された距離  $R_i$  の残差,  $\Delta R_i$  は, 式 4.14 のように  $\Delta R_i = R_i - R_0$  と求めることができる. 式 4.14 における変化量を  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  とし線形化を行うと, 式 4.14 は式 4.15 のように表現できる.

$$\Delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial R}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial R}{\partial z} \Delta z + \Delta S \quad (4.15)$$

式 4.14 を求める時, 各変数に対して偏微分を行った式が式 4.16 ~ 4.18 になる.

$$\frac{\partial R}{\partial x} = \frac{-(x_i - x_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial R}{\partial y} = \frac{-(y_i - y_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial R}{\partial z} = \frac{-(z_i - z_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \quad (4.18)$$

式 4.16 ~ 4.18 から, 各変数に対する偏微分項を  $\alpha, \beta, \gamma$  と置くと, 式 4.15 は式 4.19 のように行列同士の積として表現できる.

$$\begin{pmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta R_2 \\ \Delta R_3 \\ \Delta R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta S \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

そのため, 式 4.20 のように行列として解くことができる.

$$\Delta R = A^{-1} \Delta X \quad (4.20)$$

式 4.20 を  $\Delta X$  について解くと、式 4.21 となる。

$$\Delta X = A^{-1} \Delta R \quad (4.21)$$

一般的に、3次元の位置を求めるには既知の位置は4点あれば十分であるが、GPSで位置測位を行う場合などのように、受信した電波全てを用いて位置を推定したほうが、その精度は向上すると考えられている。これは未知数に対して「過剰決定の状態」と呼ばれおり[15]、その時の  $\Delta X$  についての行列解は次式で表現される

$$\Delta X = \left( A^T A \right)^{-1} A^T R \quad (4.22)$$

この式を  $\Delta X$  について解くことで、誤差が求まる。  $\Delta X$  の成分が十分に小さくなかった場合、つまり、初期値に対して推測値との距離が遠かった場合、その分誤差  $\Delta X$  は大きくなるため、  $\Delta X$  分を初期値に足し、再度  $\Delta X$  について解くことで、逐次的に解を求めることができる。

### ・ 3.3.2 LoRa Anchor を用いた位置推定の場合

LoRa Anchor の初期位置と、位置推定を行った位置の真値は GPS を用いて取得した。GPS はグローバルポジションであるため、ローカルポジションに変換する必要がある。そこで、本稿では変換の際に広く使われている方法の説明を行う。

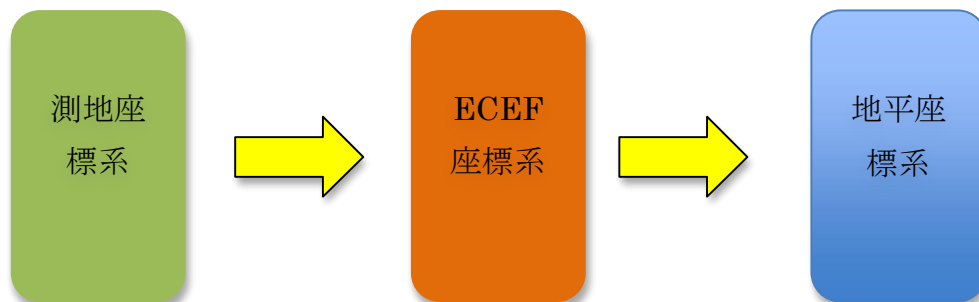


図 3.4 グローバルポジショニングからローカルポジショニングへの変換方法

図 4.4 のように、GPS で取得した緯度経度、高度は一般的には測地座標系と呼ばれている。この測地座標系を一度地球を中心とした ECEF 座標系に変換を行う必要がある。そして最後に、地球を中心とした変換を行った後、地平線上を基準として位置を変換を行う必要があるため、一般的にはこの 2 段階の変換が必要になる。次章からその変換方法と、計算の方法を紹介していく。

### ・ 3.3.3 測地座標系から ECEF 座標系へ

地球の重心を原点とした時，地球の表面近くにある受信位置の位置座標をユークリッド空間で表現することを，地球中心・地球固定直交座標系（earth centered, earth fixed）と呼ぶ[14].

測地座標系で取得した緯度経度高度を用いて，この，地球の重心を中心として測地座標系から ECEF 座標系に変換を行う[14]. 図 4.1 は地球の重心を中心と見た時の，衛星の位置座標と，受信側の位置座標を地球を中心として表現した概念図である．

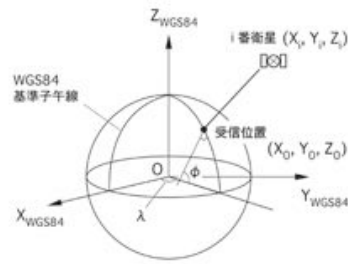


図 3.5 ECEF 系と測地座標系の概念図<sup>9</sup>

図 4.1 のように，地球の重心を中心とすれば受信位置をユークリッド座標空間で扱うことが出来る． $a$  を赤道平均半径  $b$  を短半径とすれば，離心率  $e$  と偏平率  $f$ の間には

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} / a \quad (4.1)$$

$$f = (a - b) / a \quad (4.2)$$

式 4.1, 4.2 のような関係が成り立つ．ここから，緯度を  $\phi$ ，経度を  $\lambda$ ，楕円体高を  $h$  とすると，受信地点のユークリッド空間での位置座標  $(x, y, z)$  は式 4.3 ～ 4.5 のように表現できる[14]

$$x = (N + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (4.3)$$

$$y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (4.4)$$

$$z = \{N(1 - e^2)\} \sin \phi \quad (4.5)$$

この時， $N$ ,  $e$  は式 4.6, 4.7 で計算される．

<sup>9</sup> 理解するための GPS 即位計算プログラム入門より引用[14]

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \Phi}} \quad (4.6)$$

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (4.7)$$

$a$  は赤道平均半径として, 6378137m,  $f$  は扁平率で 1/298.257223563 が定数となっている.  
 このような変換で, 緯度経度から ECEF 座標系に変換を行った.

### ・ 3.3.4 ECEF 系から地平直交座標へ

基地局の測地系座標を ECEF 座標に変換した後, これをさらに地平座標へ変換する必要がある.  
 地平直交座標は, 地平表面付近のある点を基準点としてその点から垂直方向に向かう点を  $Z$ ,  $Z$  に  
 対して直角に  $X$ , 北方向に  $Y$  軸を取るのが一般的である[14]. 求めたい座標を  $(x, y, z)$ , 変換後の  
 ユークリッド座標を  $(e, n, \mu)$  とすると, 式 4.9 ~ 4.12 で変換を行うことができる.

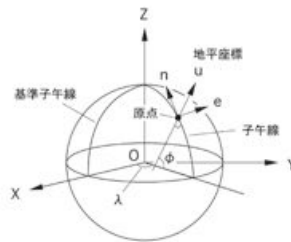


図 3.6 ECEF 座標から地平直交座標変換の概念図<sup>10</sup>

$$R(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

$$R(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

$$R(z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

<sup>10</sup> 理解するための G P S 測位計算プログラム入門(1)より引用[15]

$$\begin{pmatrix} e \\ n \\ \mu \end{pmatrix} = R(z, 90)R(y, 90 - \phi)R(z, \lambda) \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

$(x_0, y_0, z_0)$  は原点で、原点は自分で設定することで、原点を基準とした直交座標を求めることができる。位置推定を行うための空間を、緯度経度から直接計算が行なえる地平直交座標に限定することができる[14]。本研究ではこの、地平直交座標に真値と推定値を置くことで、その推定精度を求めた。



## 第 4 章

# 森林環境における位置推定の実験

### ・ 4.1 実験の目的

森林環境において動物がセンシングしたデータの位置情報を付与するため、実際の森林環境において位置推定を行う。具体的にははじめに、LoRa の距離ごとの RSSI の減衰モデルを作成したあと、フリスの公式によりモデル化を行う。その後、実際に基地局側から電波を送信し受信側の位置を推定する。また、本研究では高低差も考慮するため 2 次元座標ではなく、3 次元座標で位置を推定する。

### ・ 4.2 実験場所

今回、実験を行うにあたって選んだ場所は、東京大学が保有している秩父演習林である。この場所は東京大学が所有しているため山道が整備されているため、実験がしやすい。一方で、山の高低差や周りの森林環境など、実際に本システムを実装する場合に想定される環境に近いという特徴を有する。

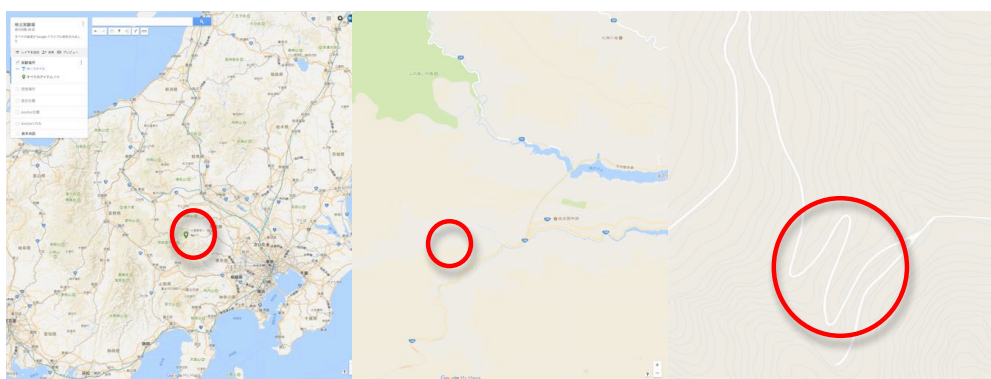


図 4.1 実験場所(東京大学秩父演習林)

### ・ 4.3 実験機材

実際に LoRa を森林環境に設置する場合は位置推定の精度を考慮して、遮蔽や高低差が少ないところに置くのがベストだと考えられるが、森林環境で必要とされる LoRa Anchor の密度を推定することが本実験の目的であるため、今回は狭いエリアに十分な数である 15 台 LoRa Anchor を設置した。設置した 15 台の LoRa Anchor は周りにある森林の密集度や、遮蔽の状況が微妙に異なる。よって、これらの情報を使えば、実際の運用を考えた時どこに LoRa を置くべきか、議論しやすいと考えた。使った LoRa は EASEL 社の物を用いて[28]、マイコンは Raspberry Pi model 3 を用いて操作を行った。

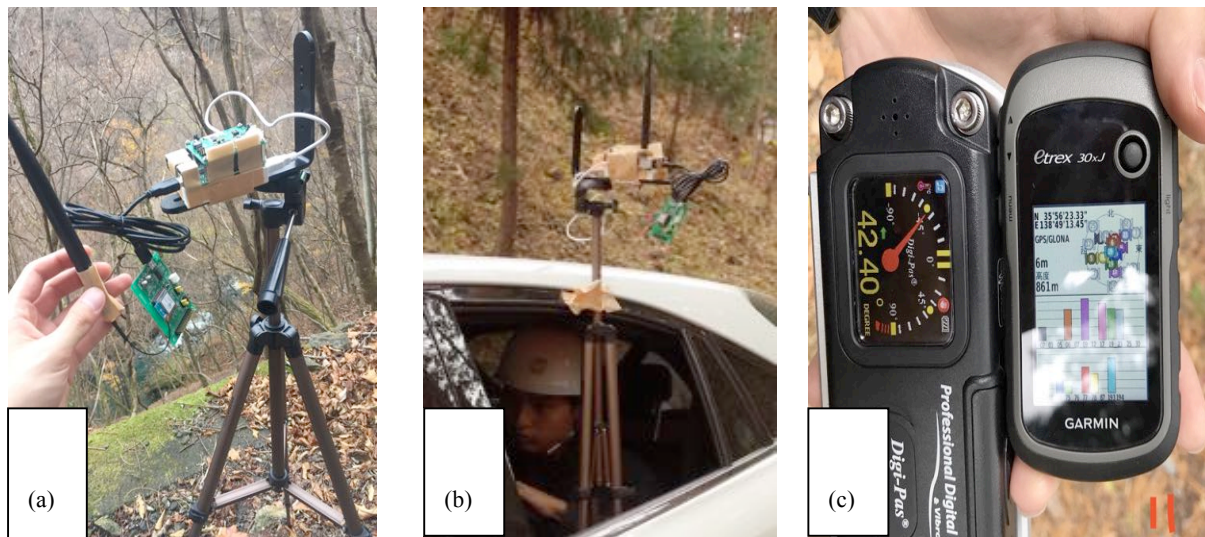


図 4.2 実験に使用した機材

図 5.2 の (a) の LoRa Anchor を 15 台設置し、図 5.2 の (b) のように車に装着した LoRa で受信を行った。今回は車を動物と見立てて受信を行い(図 5.3)、その時の図 5.2 の(c)の Garmin Etrex の GPS を用いて真値を取得した

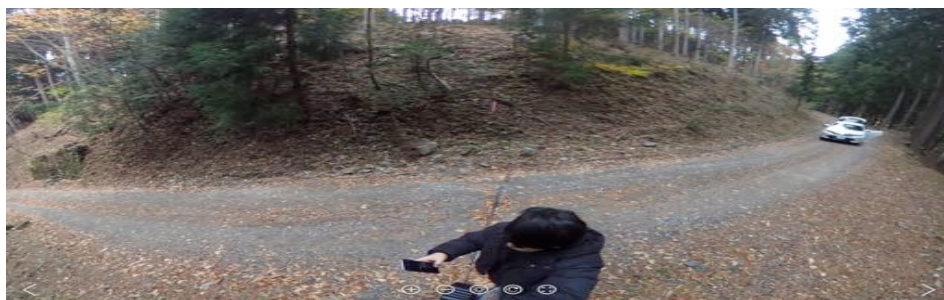


図 4.3 実験風景

今回は拡散率 7, 帯域は 500kHz の設定で LoRa を設定した. 以下, 表 5.1, 5.2 は EASEL 社の LoRa の伝送レートと消費電力になる.

表 4.1 LoRa のデータレート

		SF					
		7	8	9	10	11	12
BW	62.5	2, 734	1, 563	879	488	269	146
	125	5, 469	3, 125	1, 758	977	537	293
	250	10, 938	6, 2500	3, 516	1, 953	1, 074	586
	500	21, 875	12, 500	7, 031	3, 906	2, 148	1, 172

表 4 2 LoRa の送信出力と消費電力の関係

送信出力	消費電力
13dBm	43mA
7dBm	35mA

## ・ 4. 4 実験方法

各 Anchor の位置を GPS で測位した．使った GPS は Garmin の Etrex 30-J で（図 5.2 c），各 Anchor の場所は Theta で撮影を行った．各地点の Local Position は GPS などの Global Position で取得するのは好ましくない．Local Position を正確に取得するには，測量系などを用いて古典的な測量を行った方がより，信頼性の高い位置を取得できる．

しかしながら，今回 Anchor の設置台数は 15 台と比較的多く，また，森林環境という比較的 Anchor の設置コストがかかる環境だったことと，実験補助者が 5 人と少なかったため，古典的な測量は諦め GPS での測量を試みた．図 5.4 にある秩父演習林の中にある位置に LoRa Anchor を設置し．図 4.4 の青色の枠内の内側でランダムに電波を受信した．その時の真値も GPS を用いて取得した．GPS での位置は実際の位置とくらべて誤差があるため，基地局側に関しては，LoRa Anchor を設置した時，一緒に撮った写真から Google Map 上でマップマッチングを行った．その為，最大で 5m の誤差が乗っている可能性がある．受信側では最大で 10m の誤差が乗っている場合がある．

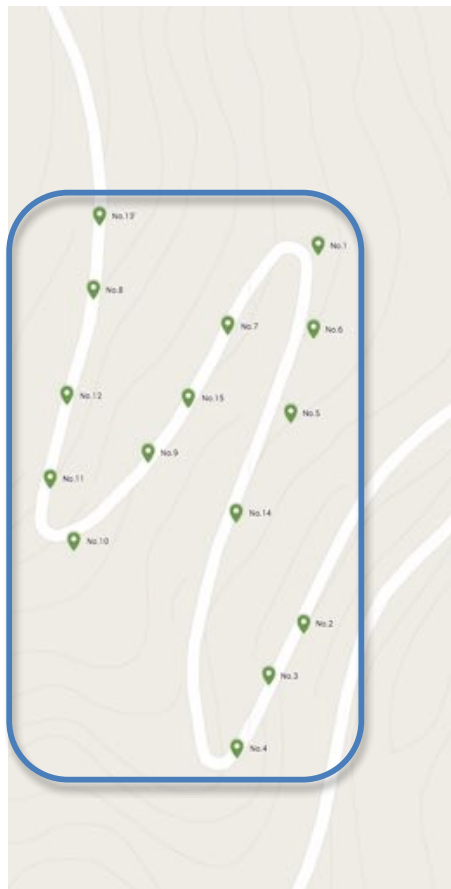


図 4. 4 実験場所と Anchor の設置場所

## ・ 4.5 結果と考察

ここでは、測定された 15 台の LoRa の距離毎の RSSI を示した後、それぞれのモデルに対するフリスのモデルのパラメータを示す。これらの図を分けるのは、RSSI のバラつきと、そのバラ付きに対するモデルの精度を別々に議論するためである。

### ・ 4.5.1 Anchor 毎の RSSI のバラつき

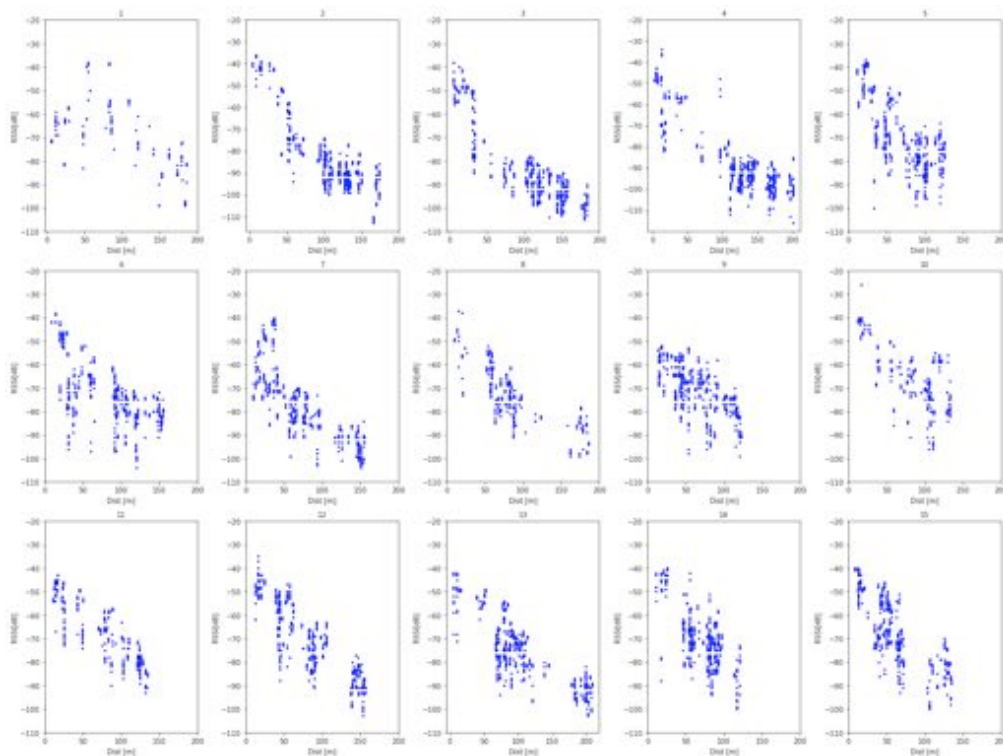


図 4.5 各 LoRa の実測値

各 Anchor からの RSSI は上記のようになった。図 5.5 から分かる通り、LoRa の RSSI は距離が同じでもその振れ幅はかなり大きい。よって、上記でも述べたが、3 点測量で円が 1 つの点で交わることは殆ど無いと言っても過言ではない。一方で、EASEL 社製の LoRa は最大-142dBm まで電波を受信することが出来るため、図のように 200m 付近で約 -100 ~ 110dBm となり、かなりゆらぎも大きいため、森林環境では最大で 200m 間隔でしか、LoRa Anchor を置くことが出来ないことが分かる。



## ・ 4.5.2 Anchor 毎のフィッティング

最小 2 乗法を用いて各 Anchor のフリスの公式のパラメータを求めた。その時の回帰式の様子を以下に示す。

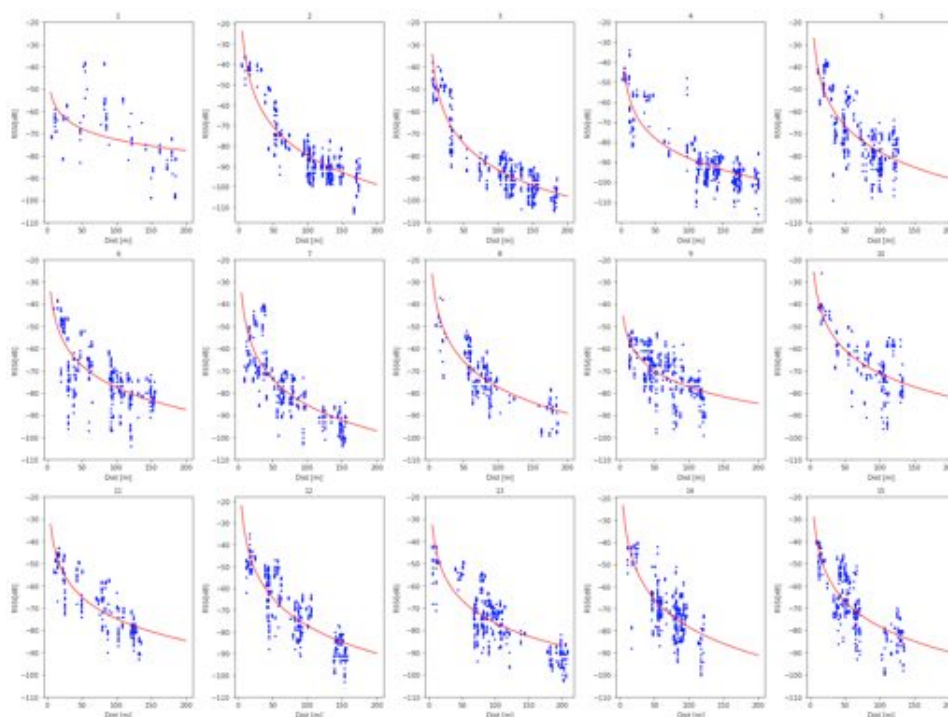


図 4.6 各実測値とモデルの比較

次に決定係数を用いてモデルの予測精度を測定した。決定係数はモデルの回帰式の精度を表す指標となっており、値は最大で1をとる。決定係数が1に近ければ近いほど、そのモデルは実測値を説明できていると解釈する。各 LoRa Anchor に対して、公式による回帰式がどの程度精度を表しているか、その結果を以下に示す。

表 4.3 Anchor 毎の寄与率（決定係数）

	決定係数	
Anchor の番号	1	0.202
	2	0.594
	3	0.700
	4	0.755
	5	0.414
	6	0.455
	7	0.483
	8	0.470
	9	0.409
	10	0.400
	11	0.565
	12	0.486
	13	0.526
	14	0.360
	15	0.474

上記のように、決定係数は 0.5 ~ 0.7 である。つまり、森林環境においても Log Distance Model により RSSI の距離に対する減衰モデルを近似できることが分かった。

よって、これらの Anchor に対するフリスの公式のモデルを用いて、位置推定を行う。

## ・ 4.6 位置推定

LoRa Anchor の設置場所とその個数を変化させながら、位置毎の推定精度を比較していく。はじめに、推定したエリアを 4 つに区分けした。区分けした 4 つのエリアごとに位置推定を行い、エリアごとの推定平均誤差をもとめた。

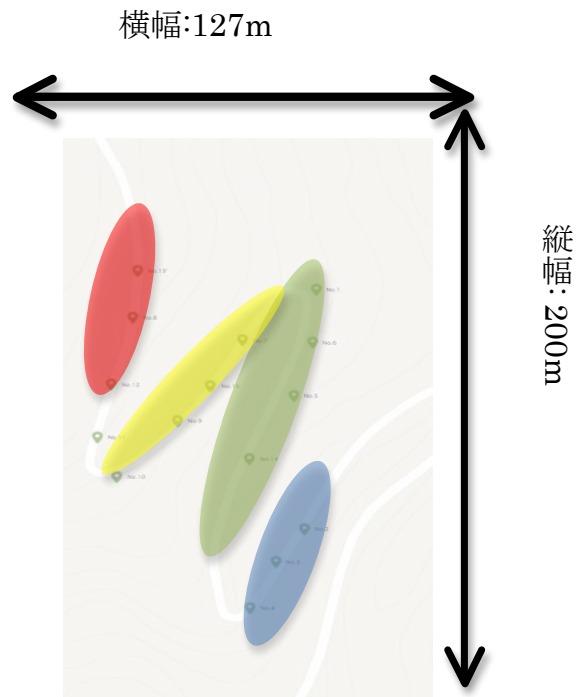


図 4.7 区分けした 4 つのエリア

実際森林環境に何台の LoRa をどのように設置するかは、位置推定の精度を決める重要な問題である。15 台の LoRa Anchor を設置したが、ここからどの LoRa Anchor の電波をいくつ使うかで、精度がどのように変化していくかを調べる必要があると考えた。そこで、LoRa Anchor の設置の方法を考えた。始め、エリア全体を覆うよう、3 次元空間の位置推定を行うのに必要最低限である 4 台の LoRa Anchor を用いて位置推定を行った。この理由としては、実際の運用状況を考えた時、設置コストを低くするため、なるべく Anchor 同士を離れて設置することで、設置台数を減らすことを目的としたからだ。この状態から 1 台ずつ LoRa Anchor を増やししながら、各エリアの推定精度がどのように変化していくかを調べた。この時、LoRa Anchor は、Anchor 同士がなるべく距離が開くよう、図 5.8 のように設定した。

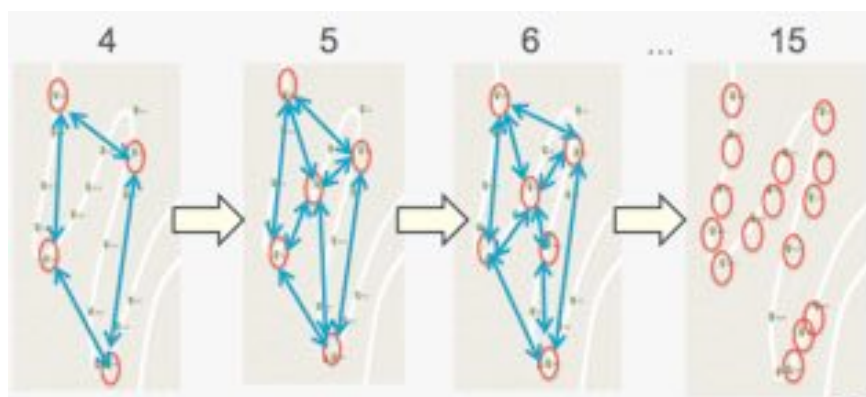


図 4.8 LoRa Anchor の設置方法



また、第3章で説明したように今回は繰り返し最小2乗法を用いて位置推定を行ったが、この計算手法は初期位置の設定の仕方によって、全体の計算量に影響を与える。今回の実験では、初期位置がたまたま良かった場合、解が得られるまで数分かかることはあっても必ず解が求まったが、初期位置がたまたま悪かった場合、解が発散して求められない場合があった。初期位置の求め方は、受信できた LoRa Anchor の位置を単純平均して求めた。位置推定においては2つの手法を用意し、エリア毎の推定精度を比較していく。

#### ・ 4.6.1 —手法1—

指定された LoRa Anchor の数全てを受信できた場合のみの位置の推定を行う。具体的には、図4.9のように LoRa Anchor の数を8個に設定して電波を送信した場合、8個全ての電波を受信できていなければ推定は行わない。単純に Anchor の個数が増えることで、精度がどのように変化していくかを比較するためである。



図 4.9 手法1 の概念図

以下に LoRa Anchor の台数に対する、それぞれのエリアごとの平均誤差を載せる。

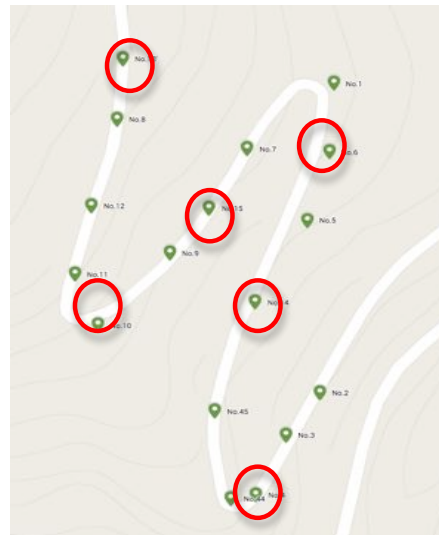
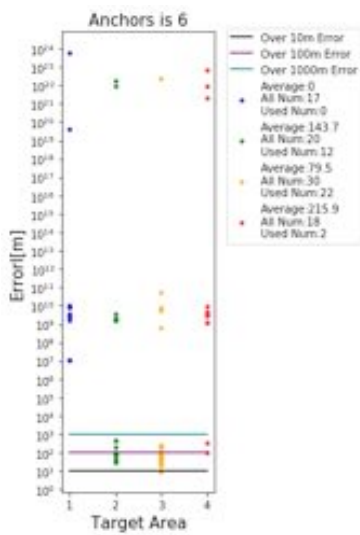
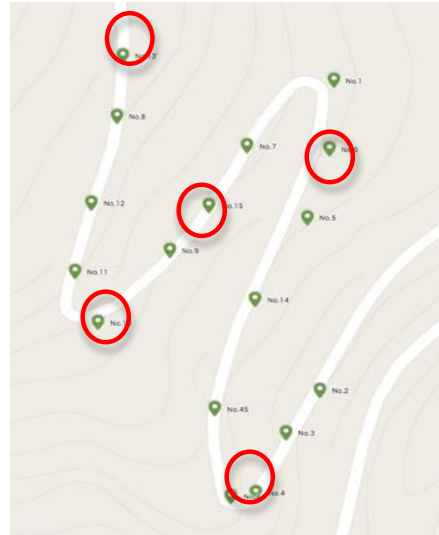
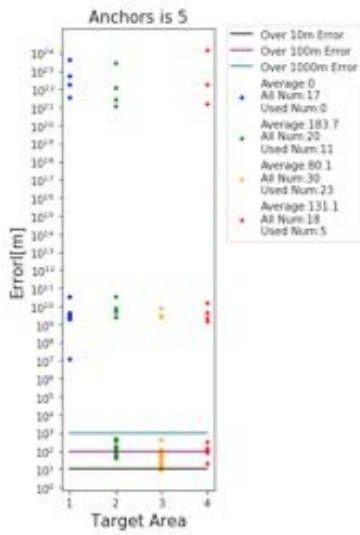
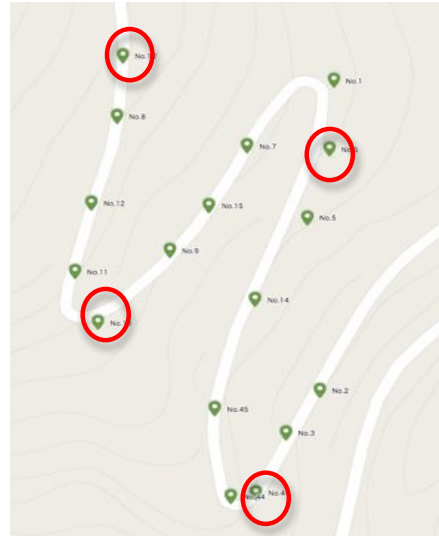
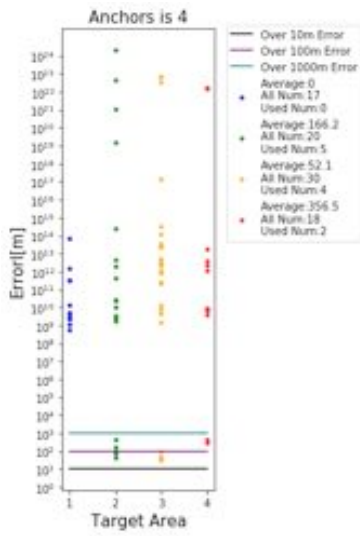


図 4.10 Anchor4 ~6 に対するエリア別平均誤差

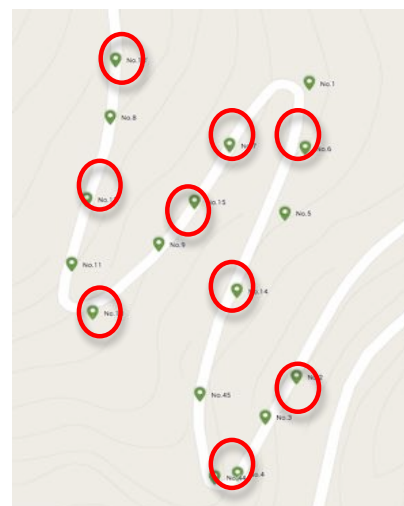
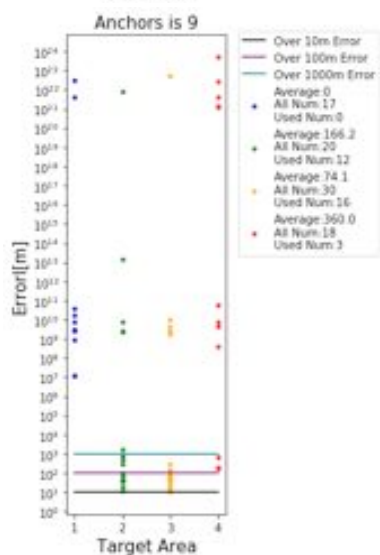
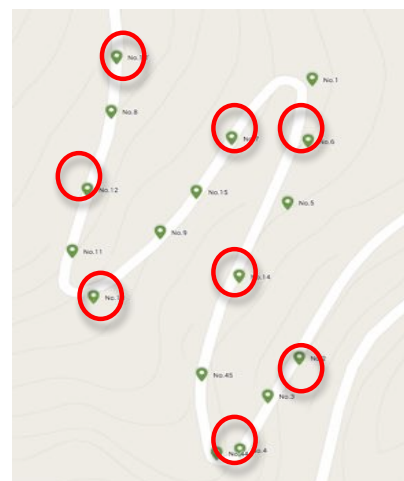
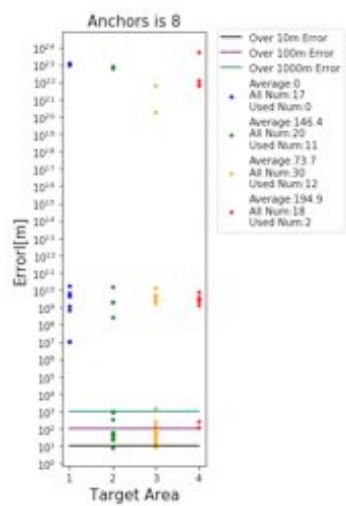
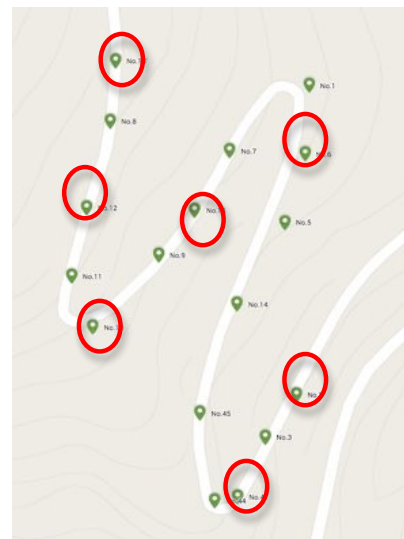
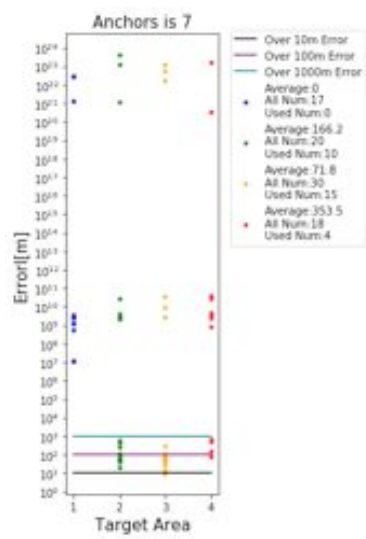


図 4.11 Anchor7 ~9 に対するエリア別平均誤差

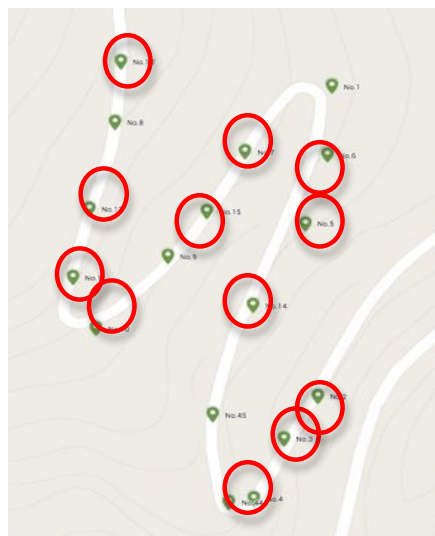
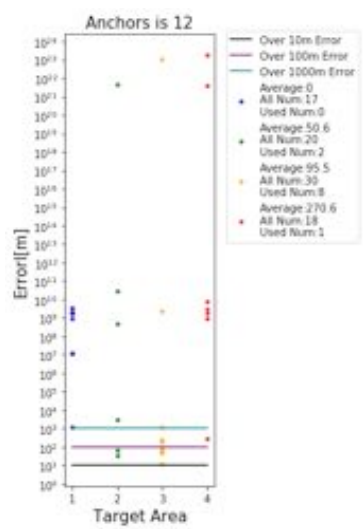
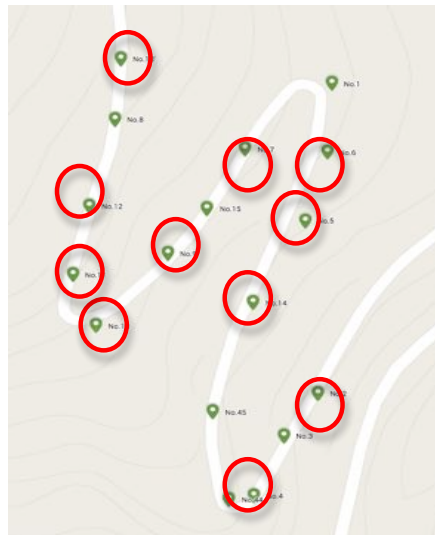
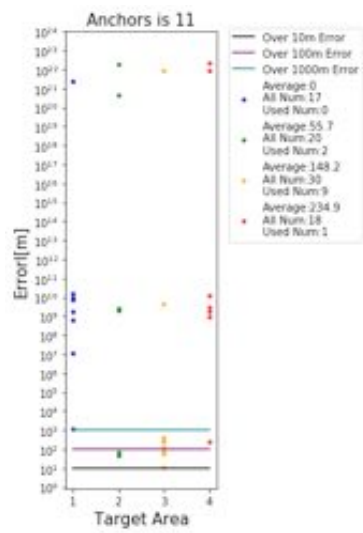
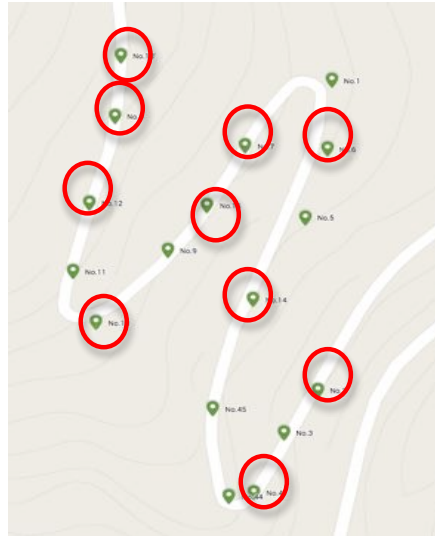
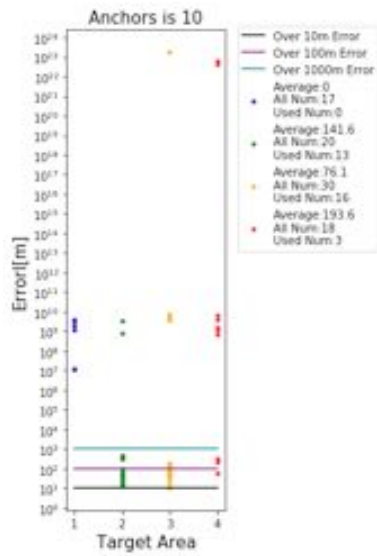


図 4.12 Anchor10 ~12 に対するエリア別平均誤差

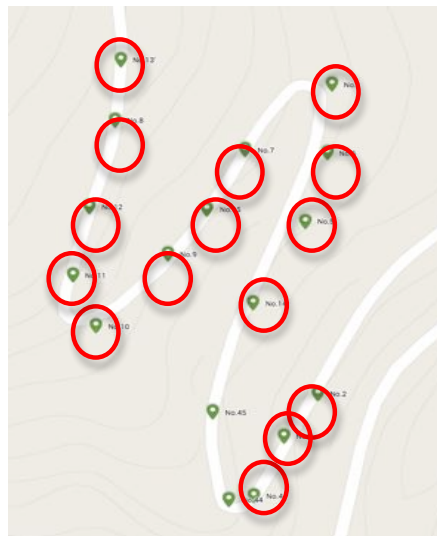
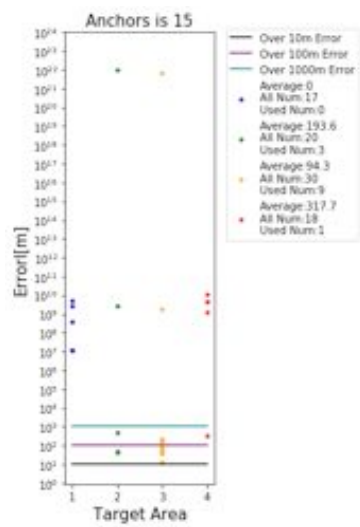
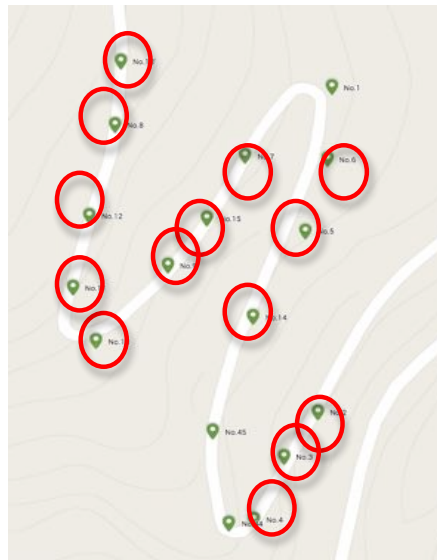
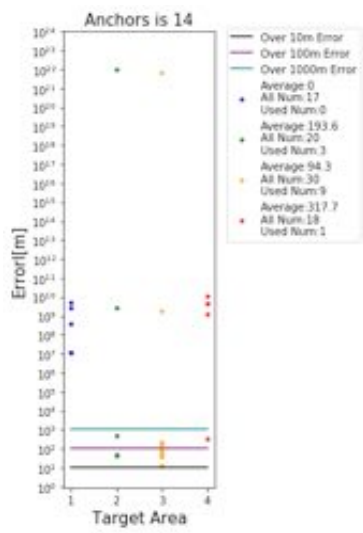
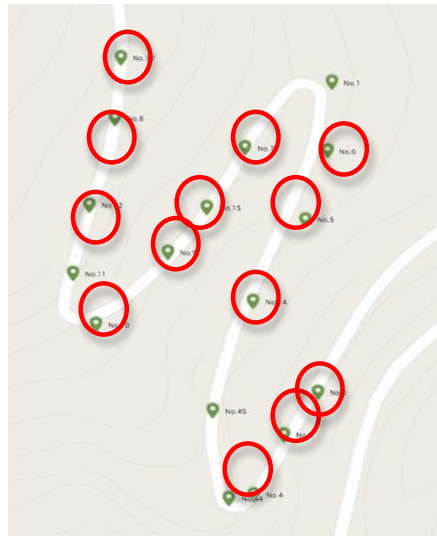
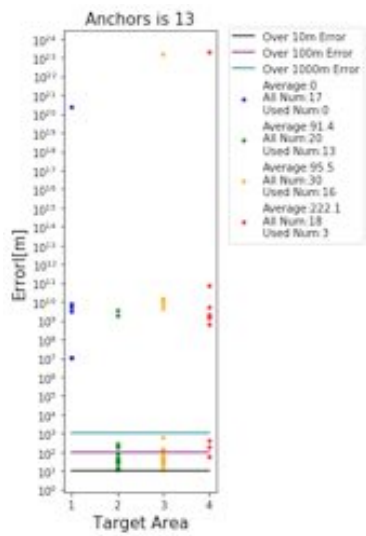


図 4.13 Anchor13~15 に対するエリア別平均誤差



図 5.12 はそれぞれの結果を 1 つのグラフにまとめた物である。横軸が LoRa Anchor の台数で、縦軸が推定平均誤差をメートルで表記したものである。

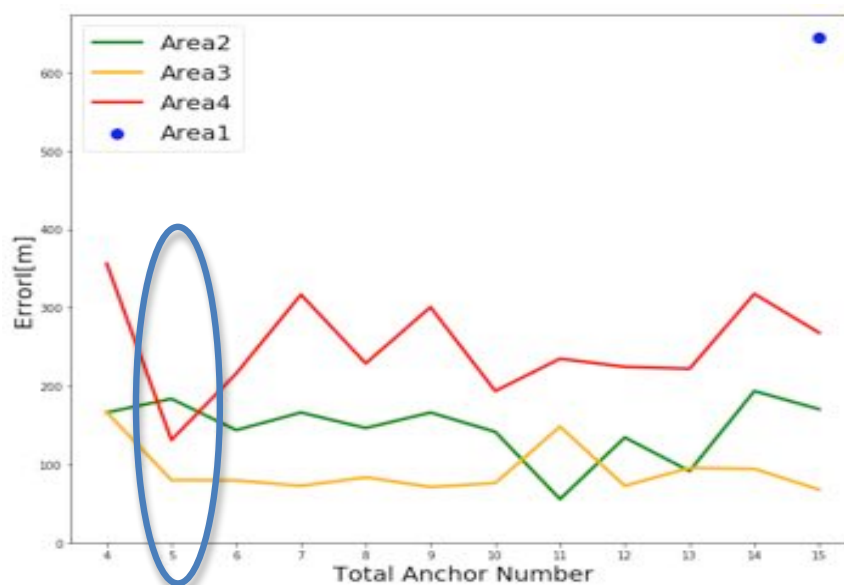


図 4.14 手法 1 におけるエリア別平均誤差

#### ・ 4.6.2 結果と考察

図 5.12 の結果から、LoRa Anchor の台数が 5 台以上で精度が頭打ちになることが分かった。このことから、手法 1 の目的として LoRa Anchor の台数とその推定精度に比例関係があるという仮定でこの実験を行ったが、結論として比例関係はあまり無いということが分かった。図 5.12 から内側のエリアのほうがより精度が良くなることがわかった。この要因として内側のエリアのほうが満遍なく LoRa Anchor からの距離が近いので、RSSI による推定距離がより正確に行えるということが考えられる。一方で青色のエリアは LoRa Anchor の台数が 15 台でないと推定が行えず、推定ができて 600m 以上と誤差は最も大きかった。その要因としては、今回実験を行ったエリアは傾斜が特にきつく、一番下のエリアから上のエリアまで 70m の傾斜が存在した。そのため、下のエリアで受信できる電波は多くのノイズが乗っていたものだと考えられる。以下、表 5.4 より、エリアごとの定量的な評価を行った。

表 4.4 手法 1 におけるエリア別平均推定誤差

		平均誤差
エリア	赤	200m ~ 300m
	黄色	100m ~ 180m
	緑	100m ~ 200m
	青	640m(1 地点のみ)

### ・ 4.6.3 手法 2

実際の使用を想定して指定した数だけの LoRa Anchor を受信できていなくても、図 4.15 のように、その地点で受信することができた最大の LoRa Anchor の数を用いて位置推定を行う。



図 4.15 手法 2 の概念図

指定した数だけの LoRa Anchor の電波を受信できていなくても、その地点で受信することができた最大の LoRa Anchor の数を用いて位置推定を行う。具体的には、LoRa Anchor の数を 8 個に設定していた場合、8 個全ての Anchor からの電波を受信できていなくても、その地点で受信できた最大の電波の数で推定を行う。これは実際の利用状況を想定した。

LoRa Anchor の個数を手法 1 同様 4~15 まで増やしていく。増やし方は手法 1 と同じである。

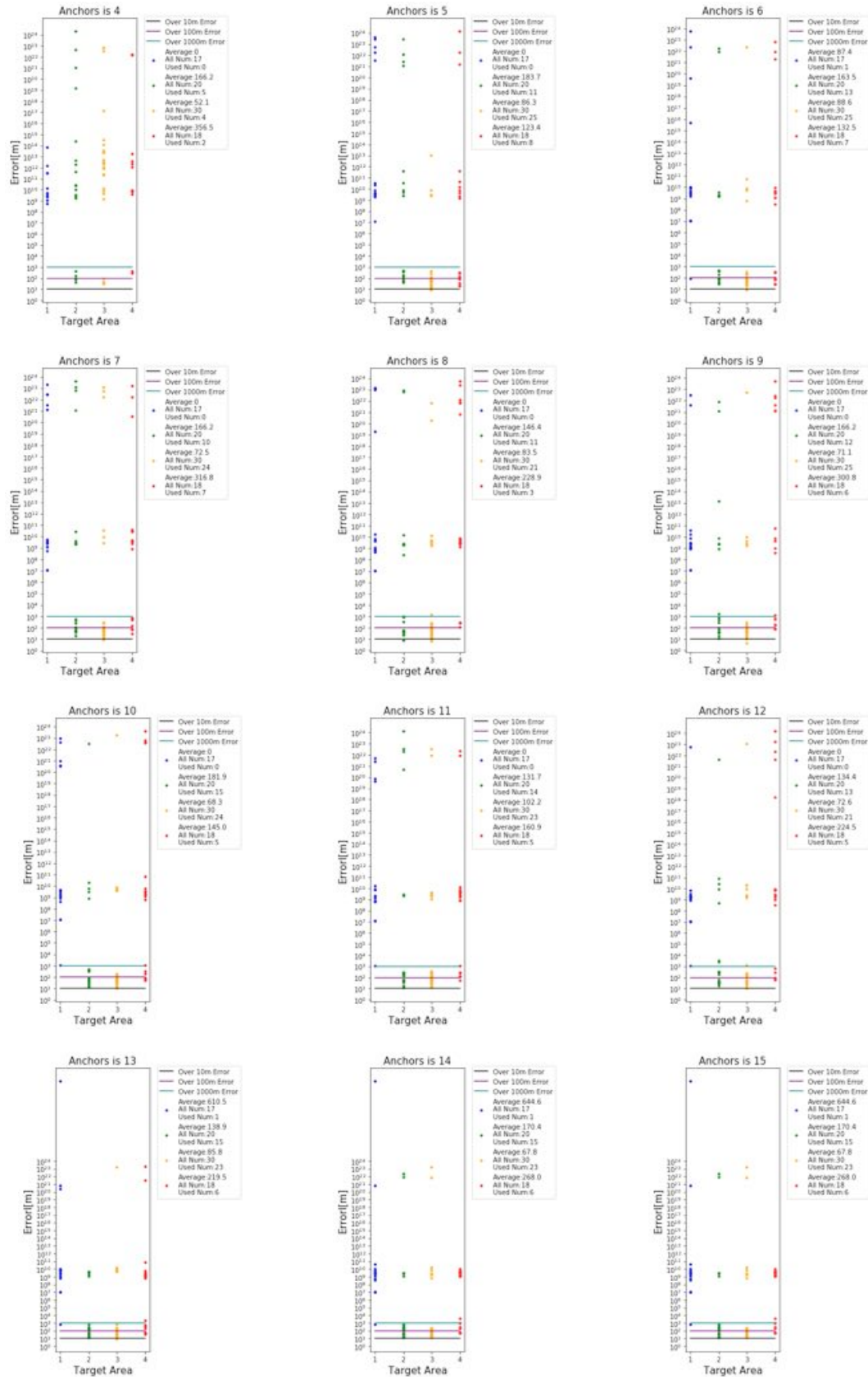


図 4.13 手法 2 における Anchor 毎の平均誤差



手法 1 同様、上記の結果を 1 つのグラフにまとめた。その結果を以下に示す。

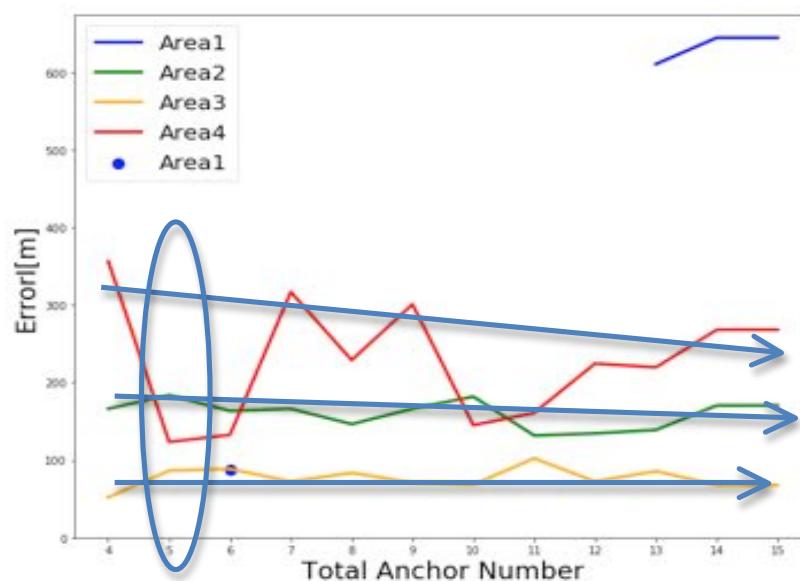


図 4.16 手法 2 におけるエリア別平均誤差

#### ・ 4.6.4 結果と考察

図 5.14 より推定の結果から、手法 1 同様 LoRa Anchor の台数を増やせば増やすほど劇的にその精度が良くなるということではなかった。概ね LoRa Anchor の台数が 5 台以上でその精度は頭打ちになることが図 5.14 から分かる。また、Anchor の台数が 4 台の場合で、緑、黄色の内側のエリアはその精度が最も良かったことが分かった。青色のエリアに関しては、手法 1 に比べて Anchor の台数が 13 台から推定を行えるようにはなったが、その精度はまだ悪いため改善の余地がある。表 5.5 は図 5.14 の結果を定量的にまとめたものである。

表 4.5 手法 2 におけるエリア別平均推定誤差

		平均誤差
エリア	赤	130m ~ 350m
	黄色	50m ~ 100m
	緑	150m ~ 200m
	青	600m ~ 650m

## ・ 4.7 有効範囲と限界

### 有効範囲

上記 2 つの手法から共通して、標高 785m から 863m まで傾斜のある 127m × 200m 四方の範囲に対して、LoRa の Anchor 同士を 45 ～ 60m 間隔で空けて 5 個以上設置すれば、誤差 100 ～ 150m の精度で推定を行うことが出来ることが分かった。そのため実際に LoRa を設置するときは LoRa が推定したい範囲を覆うように、最低でも 4 台外側に設置し、残りの LoRa を内側に設置をすることで、上記のような精度になると言える。一方で、その LoRa が張られている範囲の外側になると、傾斜が低い方は推定がほぼできない。出来たとしても誤差が 300 ～ 600m とあまり良くない。また、上側の方では精度は 200m と悪くないが、Anchor を増やしていてもその誤差は個数を増やしていても必ずしも良くならないため、現段階では Anchor の内側を推定する範囲に留めることを推奨する。



図 4. 17 LoRa の理想的な設置箇所

## 第 5 章

# 結論

本章では、本研究により得られた結果や成果の総括と今後の展望について述べていく。

### ・ 5.1 本研究のまとめ

本研究では森林環境において動物が人間の代わりにセンシングを行う動物感通信を用いた環境センシング（CPSS）の問題点として、動物がセンシングしたデータの位置情報付与に貢献した。動物の生態系や、自然環境を持続的にセンシングしていくには、人がセンシングを行うより動物に代わりにセンシングを行ってもらった方が持続可能性が高い。この構想を実現するため、GPS 不感エリアである森林環境において LPWAN の一種である LoRa を用いて位置推定を行った。

今回は東京大学保有の秩父演習林にて実験を行い、その有効性を確かめた。測定した 90 個のデータから 15 台の LoRa の RSSI の減衰曲線を Log Distance の伝達公式を最小 2 乗法で解き、それぞれのパラメータを求めた。求まったモデルに対して決定係数を求めると、概ね 0.5 ～ 0.7 となり、ある程度の精度でモデルが実測値を説明できていることが分かった。よって、このモデルを用いて位置を推定した。

推定した位置の誤差の平均を求めるため、推定した位置を 4 つのエリアに分けた。その際、2 つの手法を用意した。LoRa Anchor 同士は実際の設置の状況を想定して、最も間隔が広くなるよう LoRa Anchor を設定しながら推定を行った。3 次元空間の位置を推定するので最小の 4 個の Anchor で位置を推定し、この精度を基準に 1 つずつ Anchor の個数を増やしていった。手法 1 では単純に Anchor の個数と精度を比較するため、指定した LoRa Anchor の個数分受信できている場合のみ推定を行った。手法 2 では実際の運用を考えて、その地点で受信できた最大の LoRa Anchor の個数で位置推定を行った。その結果、手法 1 では LoRa Anchor の台数が 5 台以上になると、その推定精度が一番上のエリアと内側のエリアで頭打ちとなった。よって、このような環境に LoRa Anchor を設置する場合、ある推定したエリアを覆うように四隅に 1 台ずつ 4 台、そし

てその内側に 1 台以上 LoRa Anchor を設置するが推奨される．本研究により森林環境において LoRa の RSSI を用いて位置推定を行うことがある程度可能であることが示された

## ・ 5.2 今後の展望

今回の実験で、森林環境においては4隅に張られたAnchorに対して、比較的内側の位置は精度良く推定できることが分かった．一方で図 4.4 の青枠の外側にある場合は、内側ほど精度良く推定できないことから、例えば重み付き残差法を用いて、Anchor ごとに重み付けを行い位置推定を行うことで、精度の改善が期待できるとことが提案されている[18]．しかしながら、重みは RSSI のバラ付きによって事前に設定するため、森林環境においてこの値を事前に推測することは難しい．よって、動物の位置を森林環境で推定する際にはなるべく広範囲に LoRa を設置することで精度の改善を行うというアプローチも有効である．また、また、位置推定を行う際、初期位置は受信できた Anchor の既知の位置の平均を取った場所で始めた．マルチラテレーションはニュートン法によって逐次的に解を更新していくため、初期値が全体の計算量に大きく影響を与える．そのため、初期の位置の決め方を単純平均で求めるのではなく、受信できた Anchor の RSSI の強度から重み付けを行い、RSSI がより強い Anchor よりの位置から初期位置をスタートさせることで計算時間を減らせるのではないかと考えている．

また、リアルタイムでトラッキングを行う場合は Kalman Filter を用いると上手く行くことが広く行われているので、Kalman Filter の利用も十分に検討の余地が有る．

また、木の種類や密集度にたいして RSSI がどのように変化するか、傾斜に対して RSSI がどのように変化していくかをモデル化出来れば、他の地点や他の森林環境においても本研究と同程度の精度が得られるのではないかと考えている．

後、佐久間先生が指摘したように エリアの範囲そのものと推定誤差がほとんど変わらないのは問題なので要検討事項として書く

# 謝辞

本論文は、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 修士課程に在籍中に、取り組んだ研究をまとめたものです。修士論文執筆にあたり様々な方にお世話になりました。

指導教官である瀬崎薫教授には大学院入学前の段階で私が研究室選びに迷っていたときから、実際に入学して研究を進めて行った今日まで、多方面でお世話になりました。特に、研究テーマが中々決まらなかった自分に対して最後まで見捨てることなく、やりたい方向に研究が近づいていくよう、沢山のアドバイスをいただき誠にありがとうございました。

小林博樹 准教授にはテーマが変わった後の面倒を見て頂き、おかげさまでこうして何とか形になるものを修士在学中に作ることが出来ました。本当にありがとうございます。柏キャンパスで実験が長引き家に帰れなくなったあの日、夜遅くまで小林准教授とお話できたことは、修士在学中の貴重な思い出です。研究の方向性だけでなく、小林准教授の個人的なお話や、人生訓などお話頂き、とても視野が広がりました。

秩父演習林に泊りがけで実験をしに行った際、私の準備不足で小林准教授だけでなく、実験を手伝って頂いた小林研究室のバブラム・ニロウラ氏、斎藤研究室の下徳大祐氏、そして同じ研究室の伊藤匡一氏には多大な迷惑をかけてしまった事を、この場を借りて深くお詫び申し上げます。特に秩父演習林は標高が高く 11 月という比較的寒い中での実験だったこと、実験機材が複数あり設置から回収まで多大なる労力をかけて頂きました。皆様のおかげで、修士研究に必要なデータを、余すことなく取ることが出来ました。

伊藤昌毅 助教はテーマが変わる前まで、毎週惜しみなくミーティングの時間を割いて頂いたこと、感謝申し上げます。

東京大学 瀬崎研究室の先輩である中山悠氏、木田裕一郎氏、中川慶次郎氏、坂本敬太氏、加藤弘則氏、森英記氏、牧山紘氏、山本直人氏、鵜飼祐太氏、松野有弥氏、合間優陽氏、鈴木孝男氏、星野光玖氏、西井香織氏には飲み会や合宿、研究室でのミーティングなどで沢山の刺激をいただきました。特に、瀬崎研究室の OB の皆さんは情報系らしからぬコミュニケーション能力の高さと、気さくさに圧倒されました。

また、同期である北里知也氏、伊藤匡一氏とは研究だけでなく日々の生活やスマホコンテストやマリカなどを通じて、とても楽しい時間を過ごすことができました。特に学生スマホコンテストは3人で作った良い思い出です。賞を取れたことは勿論嬉しかったけど、研究室で開発していた時が一番楽しかったです。特に機能を切り分けて作っていたので、別々に作っていた

ものを1つに結合させ、バグが起きないように試行錯誤した時は大変でしたがとても充実した時間を過ごすことが出来ました。

北里くんはマイペースで、綺麗好きで、自分の意見をしっかり述べる所がすごく素敵です。自分の軸を持っていて、常に全体を考えている所が自分にはない視点だと思いました。“マリカを休憩室に置いてLabでの皆のコミュニケーションを増やしたい”と聞いて、個人的にはとても大きな衝撃を受けました。この2年間、北里くんには研究のアドバイスも沢山もらいましたが、それ以上に人間的に成長する場を沢山与えてもらいました。

伊藤くんとは富山のSODA合宿や秩父演習林での2泊3日の実験など、割りと2人だけで話すことが多かった分、濃い時間を過ごす事ができとても楽しかったです。伊藤くんは趣味の範囲がとても広く、急にポーランドに留学に行くなど見た目とは裏腹な、その行動力のある一面に驚かされていました。

後輩である中村祐一氏は気配り上手で、見習う点がとても多かったです。面倒くさい幹事や研究室の打ち上げの日程決め・お店決めなど、とてもテキパキこなしてくれました。スヌーピーが好きな所がまた、中村くんのキャラにマッチしてて、とても素敵だと思います。

Yao Sun氏、Tiantian Jiang氏、Song Chenwei氏、Kewei Yang氏、Ben Rukutantichoke氏とはミーティング後や飲み会の場において、国際交流が出来て非常に楽しかったです。特に、中国の物価・不動産事情についてとても詳しくなりました。

また、学会参加やその他における数多くの事務手続きを行っていただいた秘書の松本夏穂氏、内藤潤氏に感謝いたします。

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)、さがけ・科学技術振興機構(11012)・総務省SCOPE(162103107)の助成をうけ、行われた。

2018年1月22日 梅沢 啓佑

# 発表文献

梅沢 啓佑，瀬崎 薫，小林 博樹，“LPWAN を用いた森林環境における位置推定” ライフインテリジェンスとオフィス情報システム研究会（LOIS）（発表予定）

# 参考文献

- [1] 避難指示区域の状況 - ふくしま復興ステーション - 福島県ホームページ (オンライン),  
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/list271-840.html>, 最終閲覧日 : 2017- 01-05.
- [2] au サービスエリアマップ | エリア  
<http://www13.info-mapping.com/au/map/index.aspx?maptype=lte&code=19>.
- [3] 警察庁生活安全局地域課, "平成 28 年度における山岳遭難の概況", (2018)  
<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/chiiki/290615yamanennpou.pdf>.
- [4] 野外調査の安全マニュアル案  
<http://www.esj.ne.jp/safety/manual/040-010.html>
- [5] K. Nakagawa, H. Kobayashi, K. Sezaki, "Carrier pigeon-like sensing system: animal-computer interface design for opportunistic data exchange interaction for a wildlife monitoring application., " Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference, pp. 12. ACM, Kobe, Japan, (2014) .
- [6] K. Makiyama, K. Nakagawa, M. Katayama, M. Nagasawa, K. Sezaki, H. Kobayashi, "Synchronization of Peripheral Vision and Wearable Sensors for Animal-to-Animal Interaction., " The 16th International Conference on Human-Computer Interaction (HCHI 2015), 2015-08.
- [7] 合間優陽, 瀬崎薫, 小林博樹, "立ち入りが制限された地域における航空音自動認識を用いた位置推定手法の提案", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 知的環境とセンサネットワーク, B-18-32, 2016 年 9 月
- [8] 東京エレクトロデバイス株式会社, "SIGFOX, LoRa, NB-IoT3 大規格"  
[http://www.teldevice.co.jp/ted\\_real\\_iiot/column/201710/lpwan/index.php](http://www.teldevice.co.jp/ted_real_iiot/column/201710/lpwan/index.php)



- [9] SEMTECH, “What is LoRa?”  
<https://www.semtech.com/technology/lora/what-is-lora>
- [10] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O. Hersent, “LoRaWAN Specification, ”  
pp. 1–82, 2015.
- [11] Bruno Bellini, Alfredo Arnaud, “A 5mA Wireless Platform for Cattle Heat Detection.”, Circuits & Systems (LASCAS), 2017 IEEE 8th Latin American Symposium, 2017-02.
- [12] 理解するための G P S 測位計算プログラム入門 (その 1) WGS84 と座標変換のはなし  
独立行政法人 電子航法研究所 福島 荘之介  
[https://www.enri.go.jp/~fks442/K\\_MUSEN/1st/1st060428rev2.pdf](https://www.enri.go.jp/~fks442/K_MUSEN/1st/1st060428rev2.pdf)
- [13] 理解するための G P S 測位計算プログラム入門 (その 3) 測位計算のはなし 独立行政  
法人 電子航法研究所 福島 荘之介  
[https://www.enri.go.jp/~fks442/K\\_MUSEN/3rd/3rd070305.pdf](https://www.enri.go.jp/~fks442/K_MUSEN/3rd/3rd070305.pdf)
- [14] K. Pahlavan and A. H. Levesque, Wireless information networks.  
John Wiley & Sons, 2005, vol. 93.
- [15] Praveen Kumar, Lohith Reddy, Shirshu Varma, Distance Measurement and Error Estimation Scheme for RSSI Based Localization in Wireless Sensor Networks, Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN) , 2009 Fifth IEEE Conference, 2009-12
- [16] Zhang Guo jun, Li Xin , Xu Zhen long, Li Han chao “Weighted Least Square Localization Algorithm Based on RSSI Values”, Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC) , 2015 Fifth International Conference on
- [17] 株式会社ソラコム <https://soracom.jp/>

- [18] Keith E. Nolan, Wael Guibene, Mark Y. Kelly, “An Evaluation Of Low Power Wide Area Network Technologies For The Internet Of things”, Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2016 International, 2016-09
- [19] Konstantin Mikhaylov, Juha Petajajarvi, Janne Janhunen, “On LoRaWAN Scalability: Empirical Evaluation of Susceptibility to Inter-Network Interference”, European Conference on Networks and Communications (EuCNC 2017), 2017-6
- [20] Benny Vejlgaard<sup>1</sup>, Mads Lauridsen<sup>1</sup>, Huan Nguyen<sup>1</sup>, Istvan Z. Kovacs, Preben Mogensen, Mads Sørensen, “Interference Impact on Coverage and Capacity for Low Power Wide Area IoT Networks”, Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE, 2017-03
- [21] Pierre Neumann, Julien Montavont and Thomas Noël, “Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN) : A LoRaWAN case study”, Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2016 IEEE 12th International Conference, 2016-10
- [22] 高橋英樹, 村上哲明, “寄稿 II : フィールド事故について,” 日本植物分類学会ニュースレター 11 (2003) : 16-21
- [23] Kobayashi, H., Ueoka, R., and Hirose, M. “Human computer biosphere interaction: towards a sustainable society,” CHI’09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2009
- [24] 峰野博史 (静岡大 情報), 山田国裕 (静岡大 情報), 水野忠則, “簡易型屋内位置情報システムのための位置検出環境構築方法の提案”, 情報処理学会シンポジウム論文集 巻 : 2004 号, 205-208, 発行年 : 2004- 07
- [25] 株式会社 EASEL, <http://easel5.com/download/>
- [26] Adwait Dongare, Crig Hesling, Khushuboo Bhatia, Artur Balanuta, Ricardo Lopes Pereira, Bob Iannucci, Anthony Rowe, “OphenChirp: A Low-Power Wider-Area Networking Architecture”, Percom2017 Workshop

- [27] Eke B. O, Egbono F, “Designing Internet of Things System for Checking Cattle Rustling in Nigeria”, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 157 – No 7, January 2017
- [28] Ousmane DIENG, Babacar DIOP, Ousmane THIARE, Congduc PHAM, “A Study on IoT Solutions for Preventing Cattle Rustling in African Context”, ICC’17, March 2017, Cambridge city, United Kingdom
- [29] Yunsick Sung, “RSSI-Based Distance Estimation Framework Using a Kalman Filter for Sustainable Indoor Computing Environments” *Sustainability*, 2016-08
- [30] 大澤修一 中村文一 西谷紘一, “センサフュージョンによる移動体の自己位置推定：カルマンゲインの構造解析”, 第 51 回自動制御連合講演会 2008-11
- [31] 高島雅弘, 趙大鵬, 柳原健太郎, 福井潔, 福永茂, 原晋介, 北山研一, “センサネットワークにおける受信電力と最尤法を用いた位置推定”, 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J89–B No. 5 pp. 742–750 c\_, 2006
- [32] LoRa Alliance, <https://www.lora-alliance.org/>
- [33] 傳田 正利, 島谷 幸宏, 尾澤 卓思, 岩本 俊孝, 久木田 重蔵, “野生生物調査のためのマルチテレメトリシステムの開発とその応用” 日本生態学会誌 51(3), 215-222, 2001-12-20
- [34] LoRa Arduino 開発シールド AL-050, <https://soracom.jp/products/lora/al-050/>

# 付録

表 A. 1 各 Anchor 毎の Log Distance Model のパラメータ

		パラメータ
	番号	n
Anchor	1	1.782
	2	2.363
	3	2.448
	4	2.565
	5	1.894
	6	1.946
	7	2.272
	8	1.924
	9	1.960
	10	1.612
	11	1.772
	12	1.847
	13	1.978
	14	1.875
	15	1.847