

修士論文

動物による
自然環境モニタリングのための
LPWANを用いた位置推定

Position Estimation Using LPWAN for Natural Environment
Monitoring by Animals

指導教員 瀬崎 薫 教授

東京大学大学院情報理工学系研究科
電子情報学専攻 48-186410

石田 幸輝

2020年1月30日提出

目次

第 1 章 序論	6
1.1 はじめに	6
1.2 本論文の構成	6
第 2 章 研究背景	8
2.1 自然環境モニタリング	8
第 3 章 関連研究	10
3.1 参加型センシング	10
3.1.1 都市部における参加型センシング	10
3.1.2 動物を利用したセンシング	11
3.2 位置推定	11
3.3 LPWAN	13
3.3.1 LoRa	13
3.3.2 応用研究	17
第 4 章 動物を用いた自然環境モニタリングシステムの提案	19
4.1 提案手法の概要	19
4.2 LoRa を用いた位置推定手法	20
第 5 章 実験と結果	24
5.1 屋内における提案手法の実現可能性の検証	24
5.1.1 固定状態における位置推定	28
5.1.2 運動状態における位置推定	30
5.2 屋外フィールドにおける LoRa のカバレッジ検証	32
5.2.1 実験概要	32
5.2.2 環境 (障害物) の考察	34
5.2.3 拡散率の考察	37
5.3 実環境を想定した屋外フィールドにおける提案手法の検証	42
5.3.1 実験概要	42
5.3.2 座標変換	42
5.3.3 リンク測定	47
5.3.4 位置推定	47

	2
第 6 章 関連研究との比較議論	59
第 7 章 おわりに	62
7.1 本研究のまとめ	62
7.2 今後の展望	62
謝辞	64

目次

2.1	KDDIによる4G, LTEの提供エリア ¹	9
2.2	福島原発事故による避難指示区域 ¹	9
3.1	動物間マルチホップ転送方式の概念図 [1]	11
3.2	興味に基づいた犬の行動と合成加速度 [2]	12
3.3	位置推定の概要図 [3]	13
3.4	通信規格の比較	14
3.5	拡散率と通信時間 (ms) の相関 [4]	15
3.6	スター型ネットワーク	15
3.7	LoRa MAC層	17
3.8	地上と水上のカバレッジ性能 [5]	17
3.9	大学構内における場所ごとのパケット配信率の比較 [6, 7]	18
4.1	研究概要図	20
4.2	フローチャート (回収側・動物)	21
4.3	フローチャート (送信側・センサ)	21
4.4	基地局における推定可否の判定	21
5.1	リンク測定実験の様子	25
5.2	距離ごとのRSSIのばらつき	26
5.3	減衰モデルのフィッティング	26
5.4	リンク測定の様子 (机使用時)	27
5.5	APの配置図	28
5.6	固定状態における推定誤差 (m)	29
5.7	APとEDの位置関係の例	30
5.8	移動の軌跡	30
5.9	運動状態における推定誤差 (m)	31
5.10	実験の様子 (アリゾナ)	33
5.11	見通しの良いひらけた道路	35
5.12	見通しの良いひらけた道路における距離ごとのRSSIのばらつき	35
5.13	多少の障害物がある環境	36
5.14	多少の障害物がある環境における距離ごとのRSSIのばらつき	36
5.15	大きな障害物がある環境	38

5.16	大きな障害物がある環境における距離ごとの RSSI のばらつき (SF7)	39
5.17	CSS 変調における時間と周波数の関係	39
5.18	大きな障害物がある環境における距離ごとの RSSI のばらつき (SF7~10)	40
5.19	大きな障害物がある環境における距離ごとの RSSI のばらつき (SF12)	41
5.20	実験エリア (秩父演習林)	43
5.21	固定センサの配置図	44
5.22	実験道具 (秩父演習林)	44
5.23	測地座標と ECEF 座標 ²	46
5.24	ECEF 座標と地平座標 ⁵	47
5.25	距離ごとの RSSI のばらつき (秩父演習林)	48
5.26	受信ポイント (真値)	49
5.27	3次元の位置推定における誤差	50
5.28	2次元として扱った場合の位置推定における誤差	51
5.29	初期位置を推定に使用する固定センサ群の平均位置座標とした場合の誤差	52
5.30	各信号強度の受信回数	53
5.31	地形と信号強度の関係	54
5.32	閾値を-127とした場合の誤差	55
5.33	閾値を-125とした場合の誤差	56
5.34	座標平均か閾値か	57
5.35	閾値の設定による平均値悪化の例	57
5.36	実験場所の風景 (秩父演習林)	58
6.1	複数エリアを組み合わせたシステム概念図	60

表 目 次

5.1	LoRa の設定	25
5.2	環境変数と決定係数	25
5.3	机使用時の環境変数	27
5.4	実験パラメータ (アリゾナ)	32
5.5	拡散率とビットレート (バンド幅 = 125kHz)	37
5.6	SF12 におけるパケット損失率の詳細	40
5.7	実験エリアの詳細	42
5.8	回転楕円体のパラメータ	45
5.9	受信ポイントごとの単純平均誤差	56
5.10	受信ポイントごとの座標平均誤差	57

第1章 序論

1.1 はじめに

Internet of Things(IoT)とは、従来インターネットに接続されていなかったオブジェクト同士が、ネットワークを介して積極的に相互に情報交換を行う仕組みである。この概念はITU(International Telecommunication Union)が2005年に「ITU Internet Report 2005: Internet of Things」を公表したところで正式に提案された [8]。IoTは我々の生活や働き方を新しく変えるものである。そして、人口爆発や資源枯渇、環境汚染など、現在世界を取り巻いている課題の解決に役立つものである。これを実現するには、人間が意思決定できるように、環境をセンシングし、その情報を共有する必要がある。このため、IoTへの関心はとて高くなっており、今後もIoTやMachine-to-Machine(M2M)業界の売上高の急増が予想されている。また、ネットワークに接続されたM2Mデバイスと家電製品の数、2020年までに携帯電話やパソコンなどの加入者数より多くなるとされている [9, 10]。

このようなIoTの仕組みが最も活用を期待されているフィールドがモニタリングである。人間だけでなく、動物や自然、機械などあらゆるものが膨大な量の情報を持っている。それらの情報を可視化し理解しやすくすることで、必要な情報に対してアクセスしやすくなり、より便利な生活へとつなげることができる。多くの情報を持つものの中で、特に重要なのが自然環境である。地球温暖化をはじめとした近年頻発する異常気象による人的被害は大きく、これらの解決のためには、現状の把握と被害を拡大させないための対策が必要不可欠である。環境モニタリングを考えた時、継続的に情報を取得し続けるための準備やメンテナンスが必要であり、そのためには現地に調査員が出向く必要がある。その際のコストや安全面の管理には多大な負担がかかりうる。

近年では、遠く離れた自然と情報で繋がることを目的とした研究が盛んに行われており、このような環境に生息している動物と「協力」することによって問題を解決しようとする研究も存在する [11, 12, 13]。このように、動物によって周囲の環境をセンシングしてもらうことによって、人間がそのような地域に出向く回数を減らしながらも、環境の保護・保全を進めることができると考えられる。

本研究では、様々な問題を解決するために動物間ネットワークを用いた自然環境モニタリングを考える。そして、その実現に必要なGPSを用いない位置推定の手法や、通信機器のカバレージ検証を行うものとする。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第2章では、本研究の背景を説明し、目的を明らかにする。

第3章では、動物や LPWAN 用いた研究と位置推定に関する研究を紹介し、さらにその課題を述べる。

第4章では、本研究の主題となる自然モニタリングシステムと、その実現に不可欠な位置推定の手法について述べる。

第5章では、提案システム実現のために行った屋内での検証実験の結果と、2種類のフィールド実験によって得られたカバレッジ性能と実環境における推定精度についてまとめ、結果を考察する。

第6章では、3章で紹介した研究と本研究を比較し、性能などを議論する。

第7章で本研究のまとめと全体の考察を述べた後、今後の発展につながるポイントや展望を述べる。

第2章 研究背景

2.1 自然環境モニタリング

環境保護やより良い生活のために自然環境のデータ、例えば、 CO_2 や NO_x などの濃度をセンシングすることは重要である。しかしながら、Fig. 2.1 に示すように、日本においても 2019 年 1 月末の時点で 4G や LTE などが対応していないエリアが多くある¹。このような地域では、センシングしたデータを既存の通信網からアップデートすることができない。そのため、実際にヒトが現地に出向いてセンシングを行う必要が出てくるが、単純にコストがかかることに加え、対象が自然であることから環境破壊を無意識のうちにしてしまう可能性も否定できない。これらの理由から、自然環境のモニタリングには人的コストやデバイスの設置コストなど、多くのコストがかかる。また、モニタリングする環境はこのような森林部だけではない。ヒトが簡単には立ち入れないような区域、例えば、福島第一原発事故による避難指示区域 (Fig. 2.2, 2019 年 4 月 10 日時点) なども含まれる。このような地域の中には今もなお、数時間の滞在で一般の年間被ばく量を超える放射線量を浴びることとなる場所も存在する。そのため、出来るだけ遠隔から環境のモニタリングを行いたいが、従来の *WiFi* や *Bluetooth* は通信半径が比較的せまく、大規模に展開するには適していない。

そこで、設置コストや通信距離の問題を考慮し、通信手法として *LPWAN* を用いる。また、現地に生息する動物たちにセンサを取り付けることによってヒトの代わりにセンシングをしてもらい、自然環境のモニタリングをすることを考える。*LPWAN* を用いることのメリットとして、先述の設置コストや通信距離だけでなく、低消費電力であることも挙げることができる。消費電力が少なくなればなるほど、ヒトがバッテリー交換のためにデバイスに接触する回数を減らすことができる。

¹au service area map - <https://www.au.com/mobile/area/>

²福島原発事故による避難指示区域のイメージ (平成 31(2019) 年 4 月 10 日時点 - <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/list271-840.html>)

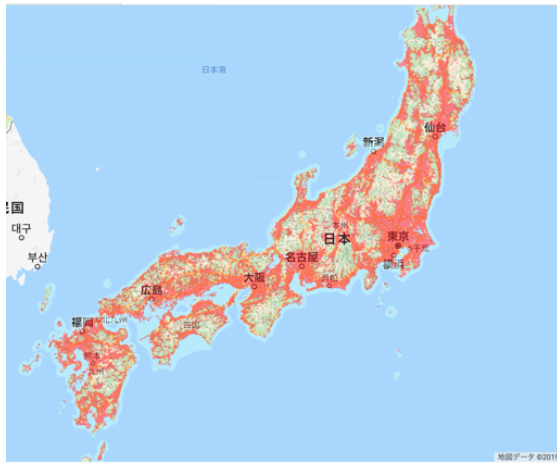


図 2.1: KDDI による 4G, LTE の提供エリア¹

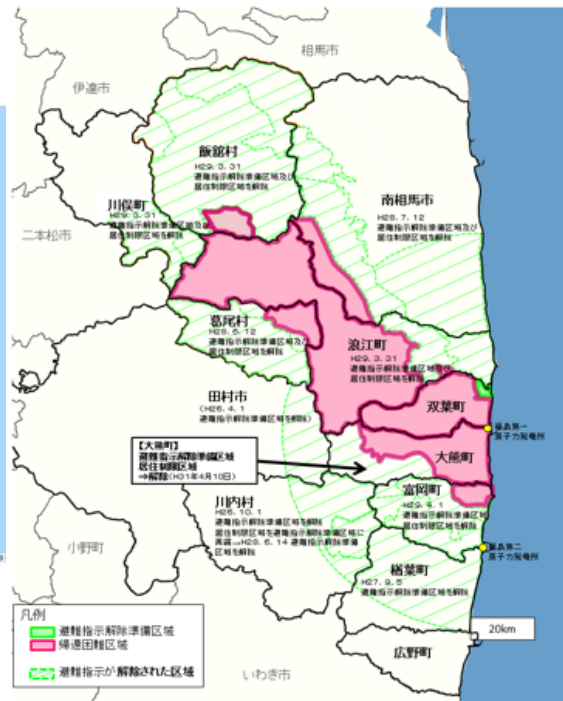


図 2.2: 福島原発事故による避難指示区域²

第3章 関連研究

本章では本研究と特に関係する3つの研究分野とその研究内容を紹介する。

3.1 参加型センシング

近年、センサの小型化に伴い、気温や湿度はもちろん、加速度や位置情報などを測定できる多様なセンサを搭載したモバイルデバイスが急速に普及している。そのようなモバイルデバイスの中で、特に普及しているものがスマートフォンである。このようなセンサを搭載したモバイルデバイスの普及に端を発して注目を浴びているのが、一般の人々が持つモバイルデバイスからセンサデータを回収する参加型モバイルセンシングである。ユーザの普段の行動から周囲の情報を収集するため、数を確保しやすく、さらに安価に行えることが特徴である。

ここでは、都市部など人間の生活圏での運用を目的としたセンシングシステムと、2章で述べたような人間が頻繁に立ち入れない環境を想定した、動物によるセンシングシステムの例を紹介する。

3.1.1 都市部における参加型センシング

都市部における大気汚染は人間の健康や環境問題に大きな影響を及ぼすことが知られている [14]。従来の大気汚染監視システムは静的な測定ステーションで行われており、精度も高いが、これらのステーションの設置と運用には多大な費用がかかるため、設置数が大幅に制限され、汚染度マップの粒度が制限されてしまう [15, 16]。そこで Hasenfratz らは、スマートフォンを使った低電力で低コストな参加型大気質監視システムを紹介し、空間的に非常に細かな粒度で大気汚染マップを作ることができることを示している [17]。

また、騒音公害も都市部において重要な問題であり、人間の行動や生産性、健康に大きな影響を与えるとされている [18]。しかしながら、騒音公害への対策は大気汚染や水質汚染より優先順位が低くなりやすい。このような問題を捉え、Nicolas らは、市民が持つ GPS を搭載した携帯を騒音センサとして扱い、日常生活における騒音公害の評価を行なうとともに、市民への意識改革を促すアプローチを行なっている [19, 20]。

このように人間の生活圏である都市部では、人間自身が手持ちのスマートフォンなどを利用して周囲の環境をセンシングすることができる。一方で、人間の生活圏から外れた環境をモニタリングする場合は、コストや安全面などから現地に生息する動物が代わりにセンシングを行うという考えのもと、いくつかの研究が行われている。

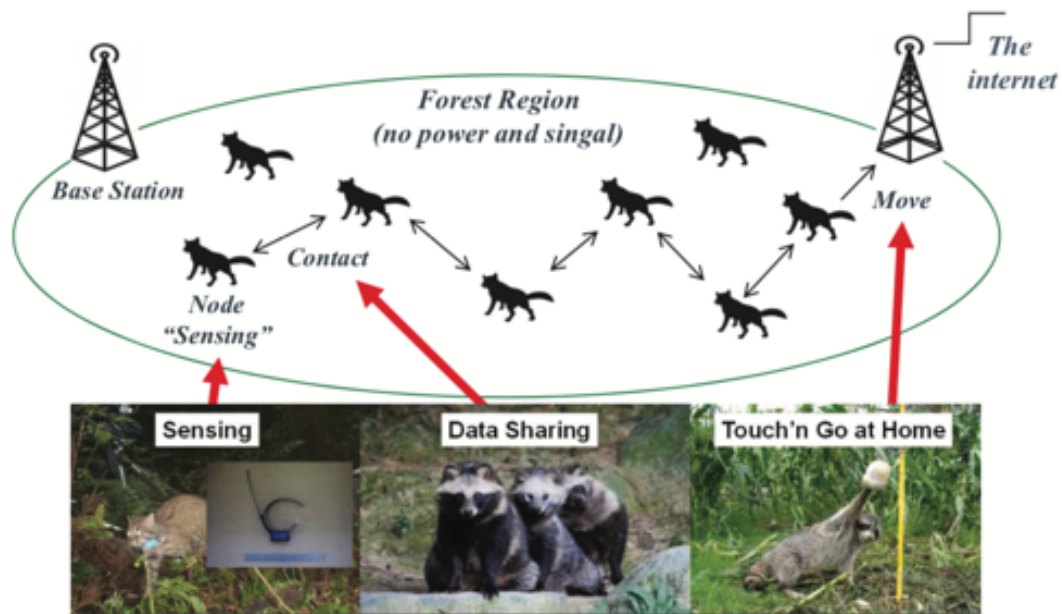


図 3.1: 動物間マルチホップ転送方式の概念図 [1]

3.1.2 動物を利用したセンシング

例えば、日本において福島第一原発事故は記憶に新しい。原発事故の影響を理解するためには、動物に対する放射線などの影響を長期的に観察することが重要であり、その調査には動物の鳴き声の数をカウントすることが効果的だとされている。そこで小林らは、インフラがない場所でも無人で長期間動作可能なシステムを開発し、福島第一原発事故による立ち入り禁止区域内の環境音のリアルタイムモニタリングを行っている [21]。中川らは、DTN 技術を利用した動物間マルチホップ転送方式 (Fig.3.1) によるこうした立ち入り禁止の森林環境における環境調査手法を提案した [2]。自然環境において動物たちが互いに遭遇した際の習性行動、例えば、相手を認識した際に一定時間行動を停止し、その後互いに歩み寄るなどの行為をトリガーとして (Fig.3.2) データの送受信を行う技術を提案した。また、牧山らは、このシステムを長期間運用できるようネットワークの省電力化を図り、ヒトの行動認識手法の一つである Epsilon Tube [22] を取り入れることによって実現した [1]。しかしながら、動物によってセンシングされたデータには位置情報が付加されていない。データがどこで取得されたかが不明であれば、そのデータの価値は大きく落ちてしまうため、取得データとセンシングした場所の対応付けは必要である。

3.2 位置推定

3.1.2 項で述べたとおり、センシングしたデータと位置の結びつけが行われなければ、そのデータがどこで取得されたものかがわからなくなり無価値となってしまう。これを解決するために、通常は端末に搭載されている、または一緒に備え付ける GPS センサによって位置情報を取得する。

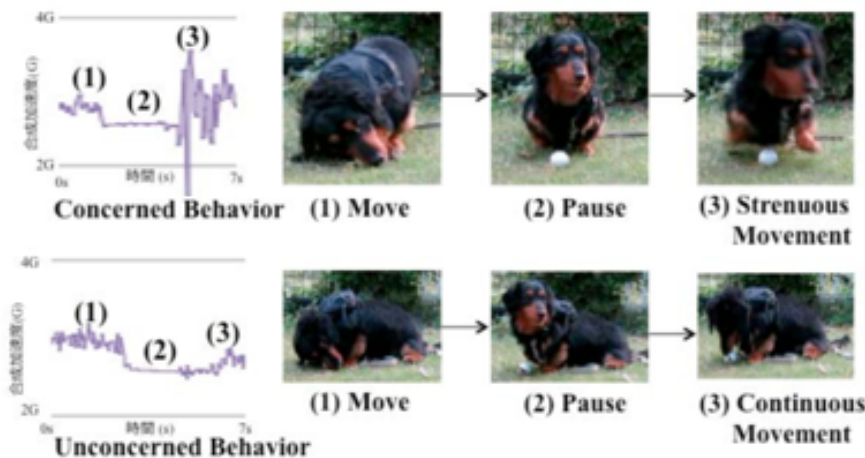


図 3.2: 興味に基づいた犬の行動と合成加速度 [2]

しかしながら、山間部や屋内、場合によっては天候の悪い日など GPS がうまく機能しない場所は往々に存在する。そのような場合は GPS に頼らない位置推定の手法が必要となる。現在研究されている位置推定手法はレンジベース方式とレンジフリー方式に大きく分けることができる。これらの違いは推定に端末間の距離を利用するか否かであるが、利用するレンジベースの方が精度が高いため、レンジベース方式の推定手法を紹介する。

まず、複数の基地局に届く信号の時間差を利用して距離を求める TDOA (Time Difference of Arrival) 方式がある [23]。位置座標が既知である最低 3 つの基地局によって測定された信号の時間差から、送信機が存在しうる双曲線を定義し、それらが重なる点を推定位置とするものである。このためには基地局間で正確な時刻同期が必要となる。

信号とは別のものの時間差を利用した例として、合間らは、GPS や時刻補正が使えないような、位置推定に利用可能な情報源が限られる条件下でも定期的に利用できるように、航空音を用いた位置同定手法を提案した [24]。航空機の位置情報は web 上で常に取得することができるため、その位置情報とあらかじめ複数設置したマイクと動物に装着したマイクで取得した航空音の時間差を利用し、最終的には動物の位置を同定するというものである。

また、電波の減衰幅 (信号強度) から端末間の距離を求める RSSI (Received Signal Strength Indicator) 方式もある。一般的なのは Finger Print 手法 [25] であるが、事前に細かなマップを作成しなければならないことに加えて、環境の変化に柔軟に対応できないという問題がある。梅沢らは LPWAN を用いて、信号強度からデバイスの位置を推定する研究を東京大学保有の秩父演習林にて行った [3]。高低差や障害物が多い GPS 不感環境でのセンシングを想定し、フリスの減衰公式 [26] を利用することで柔軟性を持たせつつ有効性を確かめた。梅沢らは 120×200 [m] ほどの実験範囲に 15 個の固定基地局を設置し、それをさらに 4 つのエリアに分割することでエリアごとに平均誤差の定量評価を行った。結果は最も良いエリアで $50 \sim 100$ [m]、悪いエリアは $600 \sim 650$ [m] となり、エリア面積を考えると推定精度としては悪い結果となった。



図 3.3: 位置推定の概要図 [3]

3.3 LPWAN

本節では、LPWAN の中でも代表的な LoRa についての技術的な説明と、実際に LPWAN を利用した研究の例を紹介する。

3.3.1 LoRa

Low Power Wide Area (LPWA) ネットワークとはその名の通り、低消費電力で広い領域を対象にできる無線通信技術である。このため、IoT や M2M に特化した活用ができると期待されている。また、非常に安価であるため大量生産も容易である。LPWAN を用いることによって通信可能距離とデバイスの数の両面から広い区域をカバーすることができることに加え、低消費電力によってバッテリー交換の回数を減らすことができる。

LPWA は通信時に無線局免許が必要な「ライセンス系」と免許不要な「アンライセンス系」に大きく分けることができる。具体的な規格を挙げると、ライセンス系には LTE cat.M1 や NB-IoT などが含まれており、アンライセンス系には LoRaWAN や Sigfox などが含まれている。ライセンス系 LPWA は日本において、従来の携帯キャリアのように総務省から包括免許を取得する必要がある¹ため、本研究ではアンライセンス系の代表である LoRaWAN を使用する。

LoRa とは Semtech によって開発された長距離低電力低データレートアプリケーション用の無線変調方式であり、基本的に Uplink から通信を開始する。また、LoRaWAN とは MAC 層を含んだ仕様全体のことを指す。LoRaWAN はバッテリー電源のみで 10 年動作する IoT デバイスを対象としている。

¹総務省、電波利用ホームページ - <https://www.tele.soumu.go.jp/index.htm>

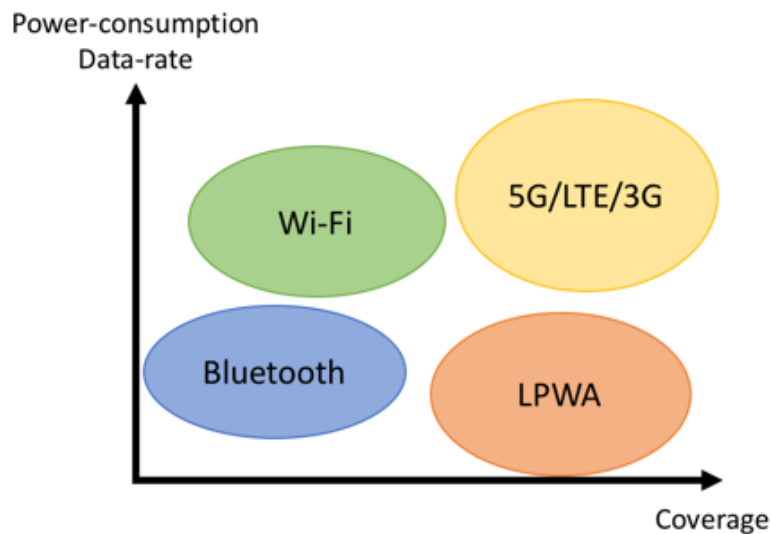


図 3.4: 通信規格の比較

PHY features

物理層について、*LoRaWAN* では各国で利用されている ISM Band にあったモデムを使用することになっている。具体的に、日本ではサブギガ帯域と呼ばれる 920 MHz 帯を使用する [27]。変調方式は *CSS* (*Chirp Spread Spectrum*, チャープ・スペクトラム拡散) に基づいており、拡散率 (SF) と帯域幅 (BW) の両方が設定可能である。拡散率を上げるとマルチパスフェージングやドップラー効果などの実際のノイズに対する耐性が上がるため、受信の感度が上がることによって遠くにも電波が届くようになる。しかしながら、距離を稼ぐため拡散率を上げると、その分スループットは落ちるという相関関係があることに注意する必要がある (Fig. 3.5)。

また、有効ビットレート R_b の計算は式 (3.1) ように行われる。

$$R_b = SF \times \frac{1}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)} \times CR \quad (3.1)$$

ここで CR は符号レートを表す。*LoRa* において拡散率は 7 から 12 の整数をとることができ、帯域幅は 62.5 kHz, 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz から選択することができるが、実際に使用できる数値は国ごとに異なる [27]。また、符号レートは基本的に $\frac{4}{5}$ となる。

Network architecture

ネットワークに関して、メッシュ型やアドホックトポロジを使用する従来の無線センサネットワークとは異なり、*LPWA* ネットワークでは、エンドデバイスにサービスを提供するためにベースステーション (ゲートウェイ/コンセントレータ) を設定する必要がある。これは基地局にしか通信しないため、それらの周りにスターネットワークを形成することとなる (Fig. 3.6)。

各要素について具体的な動作は次のようになる。

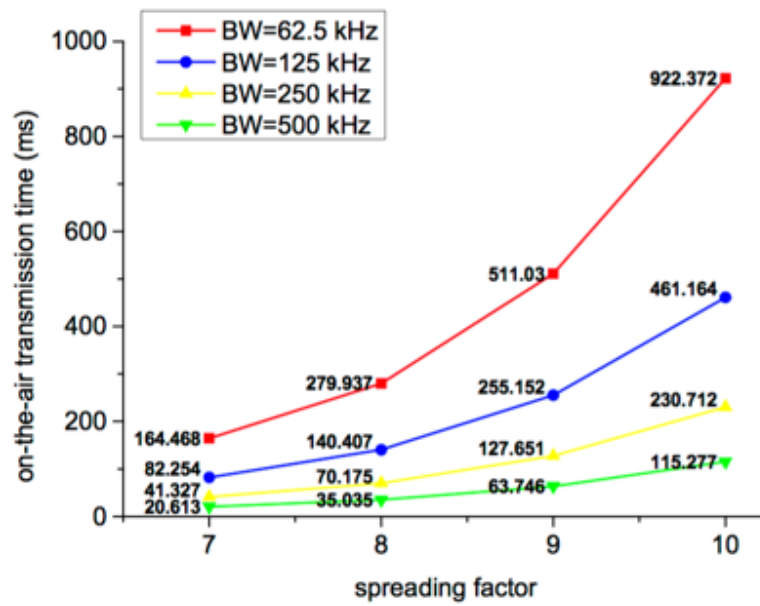


図 3.5: 拡散率と通信時間 (ms) の相関 [4]

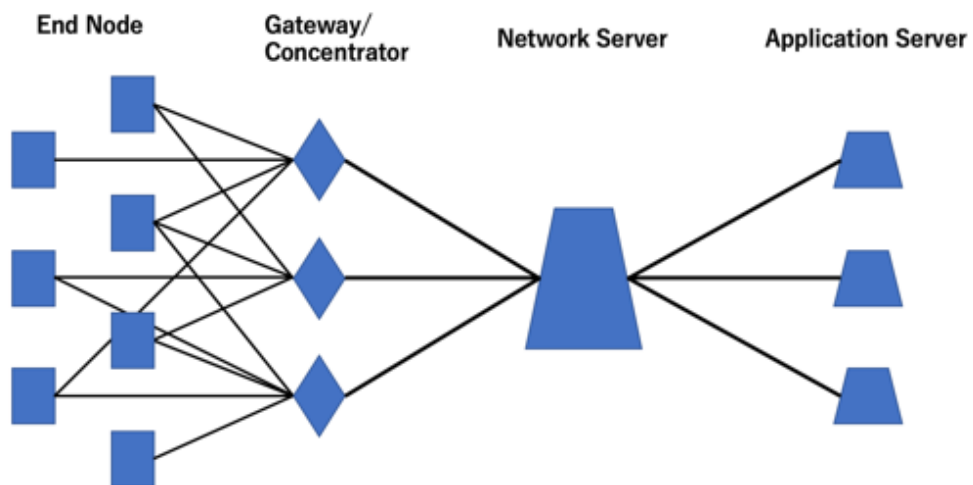


図 3.6: スター型ネットワーク

- エンドノード: センシングしたデータを収集し、それをサーバへ Uplink に送信する。また、必要ならばアプリケーションサーバから Downlink パケットを受信する。1つまたは複数のゲートウェイへのシングルホップワイヤレス通信を使用する。
- ゲートウェイ/コンセントレータ: エンドノードとネットワーク/アプリケーションサーバ間

のデータを双方向に伝達する。

- ネットワークサーバ: 有線または無線によって複数のゲートウェイにセキュアに接続し、重複するメッセージを排除する。また、どのゲートウェイが各エンドノードのメッセージに回答すべきかを決定し、エンドノードのバッテリー寿命を延ばすために適応データレート (ADR) 方式でエンドノードのデータレートを管理する。例えば、基地局によって受信された Uplink パケットの電力が十分に強力であることを検出した場合、エンドノードに対してより低い SF に切り替えて省電力にするように命令することができる。
- アプリケーションサーバ: 各エンドノードが集めたデータを収集して分析する。必要ならばエンドノードの次の動作を決定する。実用的な例を挙げると、施設全体および近くの市区町村をカバーする単一の基地局を配備することによって、病院の患者または病院の近くにある宿泊施設の遠隔監視を検討することができる。

MAC protocols

MAC 層の *LoRa* ネットワークはオープンソースであり、*LoRa Alliance*²によって定義されている。基本的な *LoRaWAN* (Class A) とオプション機能 (Class B, Class C) の3つのクラスが存在し、それぞれエネルギー効率やレイテンシが異なる (Fig. 3.7a)。以下で各クラスの構成について確認していく³。

Class A (Fig. 3.7b) は実装が必須なクラスであり、デバイス自らのデータを Uplink として送信する。特定の時間軸を経過した後に、デバイス側は一定の時間だけ受信スロットを開ける。Class A では、そのチャンスが2回あり、 $Rx1$ と $Rx2$ という2つのスロットを使うことで、Downlink 通信が可能となる。Downlink 通信が必要な場合は、これらのスロットを開いて双方向通信を行い、必要ない場合はデバイス側では受信を行わない。また、これらのスロットを開いている時間軸以外は、デバイスはスリープモードになるため、消費電力を抑えることができる。

Class B (Fig. 3.7c) はデバイスからの Uplink 通信を待たずに、Beacon という特殊なパケットを Downlink 通信として一定周期で送ることができる。*LoRaWAN* が Uplink 通信からしないといけないというところの唯一の例外となる。Class B を使うことによって、この Beacon のパケットが定期的にデバイスには降ってくるようになり、デバイスは決められたタイミングのインターバルで Downlink のスロットを設けることができる。つまり、Paging のように一方的にネットワークから投げるような動きが可能となる。

Class C (Fig. 3.7d) は Class A と非常によく似ているが、受信スロットを常に解放することによって、消費電力は増えるものの低遅延で Downlink パケットを受け取ることができるようになる。そのため、常時給電可能なユースケースや、レイテンシをできるだけ抑えたいユースケースへの使用が考えられる。

²About LoRa Alliance - <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>

³参考: LoRaWAN の仕様とネットワークアーキテクチャー - <https://blog.soracom.jp/blog/2017/03/13/bootcamp-lorawan/>

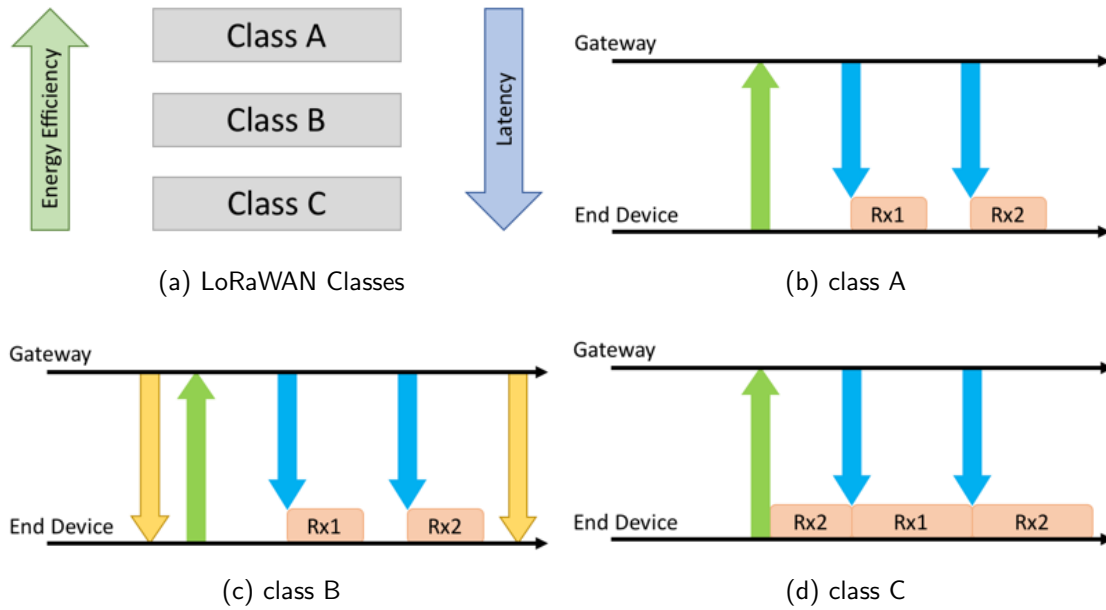


図 3.7: LoRa MAC 層

Range	Number of transmitted packets	Number of received packets	Packet loss ratio
0-2 km	894	788	12 %
2-5 km	1215	1030	15 %
5-10 km	3898	2625	33 %
10-15 km	932	238	74 %
Total	6813	4506	34 %

(a) 車 (地上) の結果

Range	Number of transmitted packets	Number of received packets	Packet loss ratio
5-15 km	2998	2076	31 %
15-30 km	690	430	38 %
Total	3688	2506	32 %

(b) ボート (海上) の結果

図 3.8: 地上と水上のカバレッジ性能 [5]

3.3.2 応用研究

LPWAN の広大なカバレッジ性能を検証する実験は数多くなされている。[5] の研究では、フィンランドのオウル市における地上と水上のカバレッジ性能を評価している。エンドデバイスは移動する車またはボートに設置されており、この実験における拡散率は最大値の 12 であった。距離によってパケット配信成功率に差はあるものの、通信可能な範囲はそれぞれ地上で 15 km、水上で 30 km である (Fig.3.8)。さらに、フィンランドのオウル大学で実施された別の研究 [6, 7] では、エンドデバイスを研究者の腕に取り付けて日常生活を送った際のパケット配信率を計測している。拡散率は最大値の 12 を使用して、半径 420 m 以内に位置する既存の基地局に 14 dBm で送信した。定点からのパケット配信率は 96.7% と記録されている (Fig.3.9)。また、研究者が歩行中のパケット配信率は 95.0% であった。日常生活を送る上で多くの時間を過ごす屋内においても正常にパケットが配信されることを確認している。

Location	Distance to the BS	No. of Tx packets	No. of Rx packets	Success ratio
Office	65±10 m	1796	1758	97.9 %
Bathroom	54±3 m	331	329	99.4 %
Coffeeroom	52±5 m	736	717	97.4 %
Restaurant	180±30 m	1245	1193	95.8 %
Library	390±30 m	878	831	94.7 %
Anechoic chamber	68±15 m	291	0	0 %
Guild room	195±15 m	340	322	94.7 %
Total (without anechoic chamber)	-	5326	5150	96.7 %

図 3.9: 大学構内における場所ごとのパケット配信率の比較 [6, 7]

この広範囲なカバレッジと低消費電力という LPWAN の特性を活かした研究もなされている。Zheng らは、本来大規模な基地局を必要とした上でメンテナンスなどにも多大なコストがかかる大気環境モニタリングに LPWAN を適用した [28]。大学近郊という都市環境を想定し、システムを構築するにあたってネットワークの性能を C/I によって評価した。その大気環境の測定結果は、既存の履歴データベースと比較した際、汚染物質 PM2.5 の濃度傾向は一致しており、精度と信頼性に足るものだと結論づけられている。

Li らは、従来の 3G ではカバレッジが足りず、通信も不安定であったセーリングのモニタリングシステム [4] を開発した。海上を移動するボートとの通信において、陸に設置したゲートウェイとの間にある障害物（樹木や高層ビルなど）によってパケット損失率が大きく変わることを示している。

これらの他にも、郊外の工場を LPWA 技術によって監視し、エネルギー効率の改善を図る試み [29] や、ロケーションベースの屋内煙感知システムの提案 [30] など、様々な研究に LPWA の技術が用いられつつある。

また、日本の企業においても LPWA ネットワークを用いた取り組みは行われている。例えば、NTT DOCOMO が、沿岸のみならず遠洋を含む海難事故の発生時に、迅速に落水者の捜索を行うためのマリンセーフティシステムの実証実験 [31] や、林業など、携帯電話のネットワーク圏外で従事する人の安否確認や事故検知に関する実証実験 [32] を行っている。

第4章 動物を用いた自然環境モニタリングシステムの提案

本章では、山間部など人間が容易に立ち入ることのできない地域における環境調査の問題を解決するために、動物を用いた環境モニタリングシステムを提案する。さらに、GPSの電波を取得しにくく、従来のインフラネットワークとも接続しにくいような環境を想定し、GPSや時刻同期を必要としない、信号強度を利用した位置推定の手法について確認する。

4.1 提案手法の概要

提案システムの概要図を Fig. 4.1 に示す。センサは位置情報が既知であり、一定時間ごとに周囲の環境情報をセンシングしてデータを蓄積する。その際、気温や大気環境の情報だけでなく、カメラなどによって動画像を保存することも考えられる。生息している動物にはセンサが蓄積したデータを回収するための端末（回収端末）を装着する。センサ-回収端末間の動作として、

1. 回収端末は Beacon を定期的にブロードキャストで送信する。
2. Beacon 送信後は一定時間受信スロットを開放し、センサからの応答を待つ。
3. Beacon を受信できたセンサは回収端末に向けて、保持している未送信データのうち一番古いものを送信する。その際、異なるセンサから送信されたデータと衝突しないように、センサごとに異なる待機時間を設けておくため、それぞれの時間幅は

$Beacon$ の送信間隔 \gg 受信スロットの開放時間 $>$ 最長の待機時間（センサ側）

となる。

4. 回収端末は受信スロットの開放が終わった後、自身のセンサをオンにして周囲の環境をセンシングする。

よって、1 サイクルで回収端末に新たに蓄積されるデータの最大数は

設置してあるセンサの数 + 1

となる。

さらに、センサと回収端末に加えて、動物が回収したデータを受け取るための基地局を用意する。基地局-回収端末間の動作は、

1. 基地局は回収端末が発した Beacon を受信した場合、基地局だとわかる専用の応答を行う。

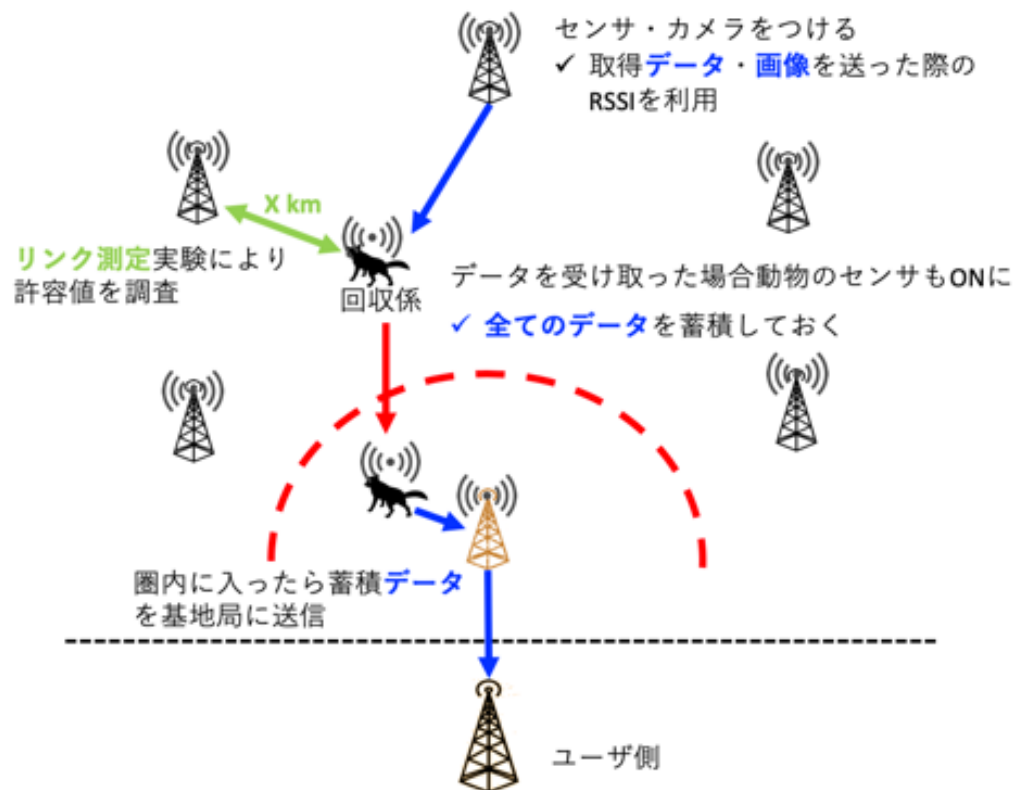


図 4.1: 研究概要図

2. 回収側がその専用応答を確認した場合、センサ-回収端末間4の後に、基地局に対して自身が保持している未送信データのうち一番古いものを送信する。

という流れとなる。今回は基地局に対して一度に送信するデータ数は1つとしたが、複数個送ることも考えることができる。

回収端末が取得した環境データ自体には位置情報は付加されていないが、その他のデータが推定に必要な個数分あれば、それらを受信した際の信号強度から位置推定を行うことができる (Fig. 4.4)。

4.2 LoRa を用いた位置推定手法

動物間ネットワークのための *LoRa* を用いた位置推定手法について提案する。GPS 不感地域などにおいてもデータの送受信のみで正確に位置を把握することが目的である。あらかじめ位置座標が分かっている複数個のノード (AP) と、位置座標が不明な Target 端末 (ED) について、以下の流れで位置推定を行う。

1. 各 AP が ED に向けてデータを送信する

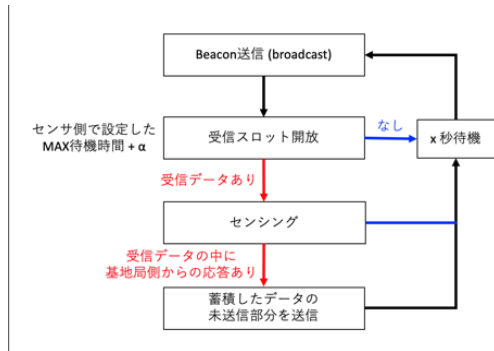


図 4.2: フローチャート (回収側・動物)

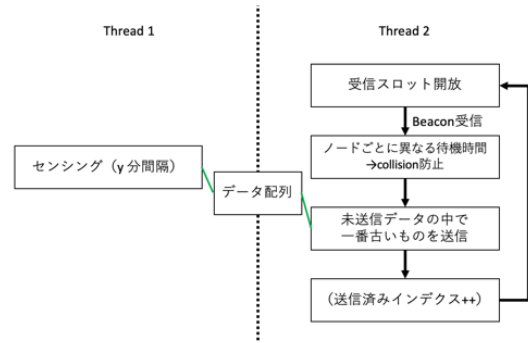


図 4.3: フローチャート (送信側・センサ)

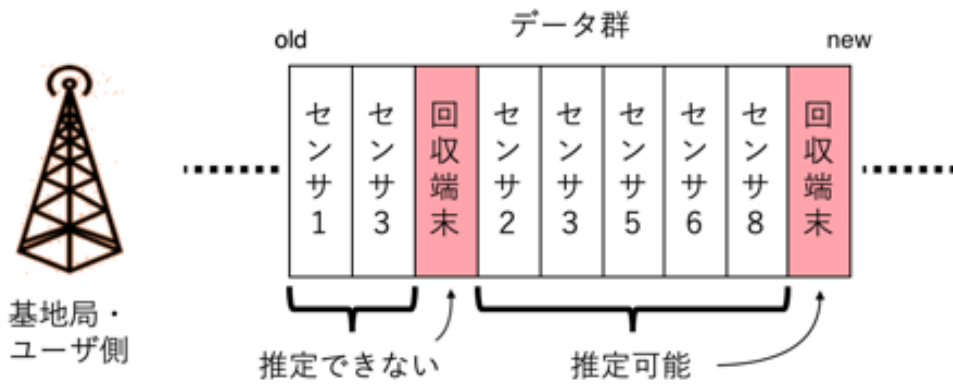


図 4.4: 基地局における推定可否の判定

2. ED がデータ (送信元 ID と信号強度) を受信する
3. 受信した信号強度から送信元との距離を推定する
4. 推定した距離を元に測位計算を行い、位置推定をする

測位計算 (観測方程式)

測位計算 (観測方程式) [33] について説明する. AP を n 個設置する場合, 1つ目の AP の位置ベクトルを S_1 とし, それぞれの要素を (x_1, y_1, z_1) とおく. 同様にして2つ目の AP の位置を S_2 , 3つ目を S_3, \dots, n つ目を S_n とする. 次に求めるべき ED の位置を $P(x_p, y_p, z_p)$ とおき, P と S_i の擬似距離を $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ とする. この時, i 目目の AP と対象 P 間の距離の真値は

$$\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2}$$

と表すことができるので、誤差を C とおくと

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2} + C \quad (4.1)$$

が成立する。

この式 (4.1) は簡単に解くことはできないので、ニュートン法を使用する。初期値 (x_0, y_0, z_0) と修正値 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を仮定することで

$$x_p = x_0 + \Delta x$$

$$y_p = y_0 + \Delta y$$

$$z_p = z_0 + \Delta z$$

と置き換えることができる。次に式 (4.1) を修正値 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ で線形化した

$$\Delta R_i = \frac{\partial R_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial R_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial R_i}{\partial z} \Delta z + \Delta C \quad (4.2)$$

という近似式を考える。ここで、それぞれの項について

$$\begin{aligned} \Delta R_i &= R_i - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \\ \frac{\partial R_i}{\partial x} &= \frac{-(x_i - x_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \\ \frac{\partial R_i}{\partial y} &= \frac{-(y_i - y_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \\ \frac{\partial R_i}{\partial z} &= \frac{-(z_i - z_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \end{aligned}$$

である。右辺の偏微分項を順に $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ とおくと、式 (4.2) は

$$\begin{pmatrix} \Delta R_1 \\ \vdots \\ \Delta R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta C \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

と書くことができる。さらに

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta C \end{pmatrix}, \quad \Delta R = \begin{pmatrix} \Delta R_1 \\ \vdots \\ \Delta R_n \end{pmatrix}$$

とおけば、式 (4.3) は

$$\Delta R = A \Delta X$$

と整理できる。ここで $n = 4$ である場合、 ΔX は

$$\Delta X = A^{-1} \Delta R \quad (4.4)$$

で求めることができる。また、 $n > 4$ の場合（過剰決定の状態と呼ばれる）、最小二乗法を用いて

$$\Delta X = (A^T A)^{-1} A^T \Delta R \quad (4.5)$$

で求めることができる。求めた ΔX の要素 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) 全てが十分に小さいかを判定し、小さいと判断された場合は (x_0, y_0, z_0) を解とする。十分に小さくなければ (x_0, y_0, z_0) に対して $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を加えて更新し、新たな (x'_0, y'_0, z'_0) で式 (4.2) 以降を条件を満たすまで繰り返す。

フリスの伝達公式

自由空間における信号強度と距離の関係は、フリスの伝達公式 [26] によって表すことができる。受信電力を P_R 、送信電力を P_T 、受信利得と送信利得をそれぞれ G_R, G_T とおくと、波長 λ 距離 d の時

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R P_T \quad (4.6)$$

と記述できる。この式 (4.6) を変形して式 (4.7) を導くことができる。

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R}{L_B} \quad (4.7)$$

(ただし $L_B = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$)

伝達公式における損失伝達である L_B に関して、デシベル表記に書き直すと式 (4.8) のようになる。

$$L_B = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (4.8)$$

これを現実空間に適用するために、右辺に係数を導入して式 (4.9) のように書き直す。

$$\begin{aligned} L_B &= 10n \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \\ &= 10n \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10n \log_{10} d \end{aligned} \quad (4.9)$$

式 (4.9) より、 L_B が損失量であることを考慮して、1m 離れた地点における信号強度を L_1 [dB] とおくと、 d m 離れた地点における信号強度 L_d [dB] は式 (4.10) によって表すことができる。

$$L_d = L_1 - 10n \log_{10} d \quad (4.10)$$

先ほど導入した係数 n は環境変数であり、理想的な環境下では $n = 2$ 、電波が反射しながら伝搬する環境では $n < 2$ 、電波が吸収される環境では $n > 2$ となる。

第5章 実験と結果

本章では提案手法実現のために行った実験とその結果を述べ、考察する。実験は以下の手順で実施した。

1. 提案手法の核となる信号強度による位置推定が実現可能かを屋内の多目的ホールで調査
2. システムがどの程度の範囲で適用可能かを調査するために屋外の農場でカバレッジ検証
3. 以上2つの結果を踏まえて、実際に運用する想定屋外の森林環境における位置推定の精度を調査

5.1 屋内における提案手法の実現可能性の検証

動物にセンサを取り付けて周囲の環境をセンシングしてもらうことを想定しているため、データを受信するEDの状態を静止状態と運動状態の2パターンで実験を行った。実験場所は、東京大学保有の駒場ロッジ本館多目的ホールである。多目的ホールの広さは横12m×縦16mである。APとEDは、*Raspberry pi Model 3+*にEASEL社の*LoRa ES920LR*¹を組み合わせて使用した。また、実験における各パラメータをTable. 5.1に載せる。

実験において、多目的ホールの隅を原点とした2次元座標を設定し、初期値 $(x_0, y_0, 0)$ は多目的ホール内 $(0 \leq x, y \leq 12 [\text{m}])$ にランダムに設定した。

今回の予備実験は、使用する各AP固有の L_d と n の測定・推定を目的とした。

実験に使用する各AP(15個)を高さ約12cmのカゴに、ED(1個)を高さ約8cmの*iRobot Create*[®] 2 *Programmable Robot*²に固定して、1mごとに1~15mの範囲で測定した(Fig. 5.1)。APはデータを1秒ごとに送信し、EDは各距離において30秒間受信スロットを開いた。

測定した距離ごとのRSSIのばらつきを各APごとにFig. 5.2に示す。Fig. 5.2から見て取れるように、8, 9mを境として、APとEDの距離によってRSSIのばらつき方に大きな差がある。

4節で求めた L_d の平均値と式(4.10)を変形した式(5.1)によって、各距離における環境変数 n_d を求めることができる。

$$n_d = \frac{L_1 - L_d}{10 \log_{10} d} \quad (5.1)$$

最終的な n は n_d の平均値とし、その n を式(4.10)に用いた際の決定係数とともにTable. 5.2に載せる。また、各APにおける回帰式をFig. 5.3に示す。

¹LoRa ES920LR - <http://easel5.com/lora.html>

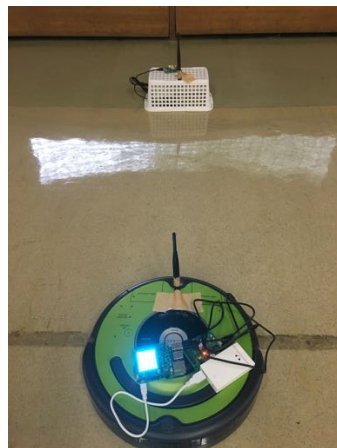
²iRobot - <https://www.irobot.com/about-irobot/stem/create-2>

表 5.1: LoRa の設定

Spreading Factor	7
Band Width	125 kHz
Effective Bitrate	5469 bps



(a) LoRa



(b) 1 m



(c) 4 m

図 5.1: リンク測定実験の様子

表 5.2: 環境変数と決定係数

	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6	AP7	AP8	AP9	AP10	AP11	AP12	AP13	AP14	AP15
n	3.022	3.002	3.200	3.145	3.432	3.093	3.149	3.146	3.002	3.207	3.070	3.187	3.242	3.222	2.956
R-squared	0.733	0.655	0.609	0.677	0.569	0.677	0.662	0.746	0.845	0.731	0.801	0.659	0.661	0.638	0.800

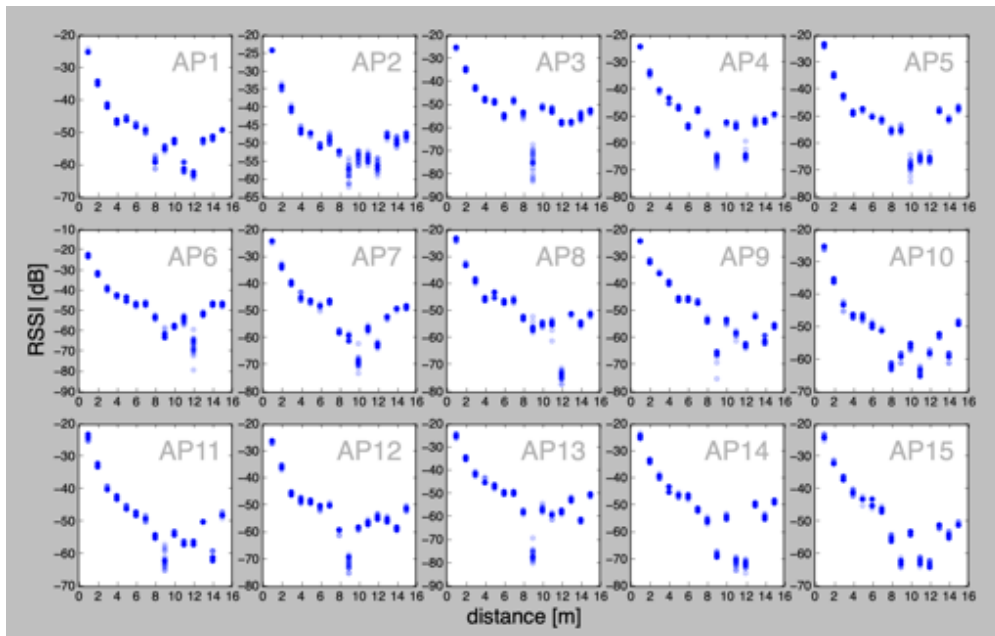


図 5.2: 距離ごとの RSSI のばらつき

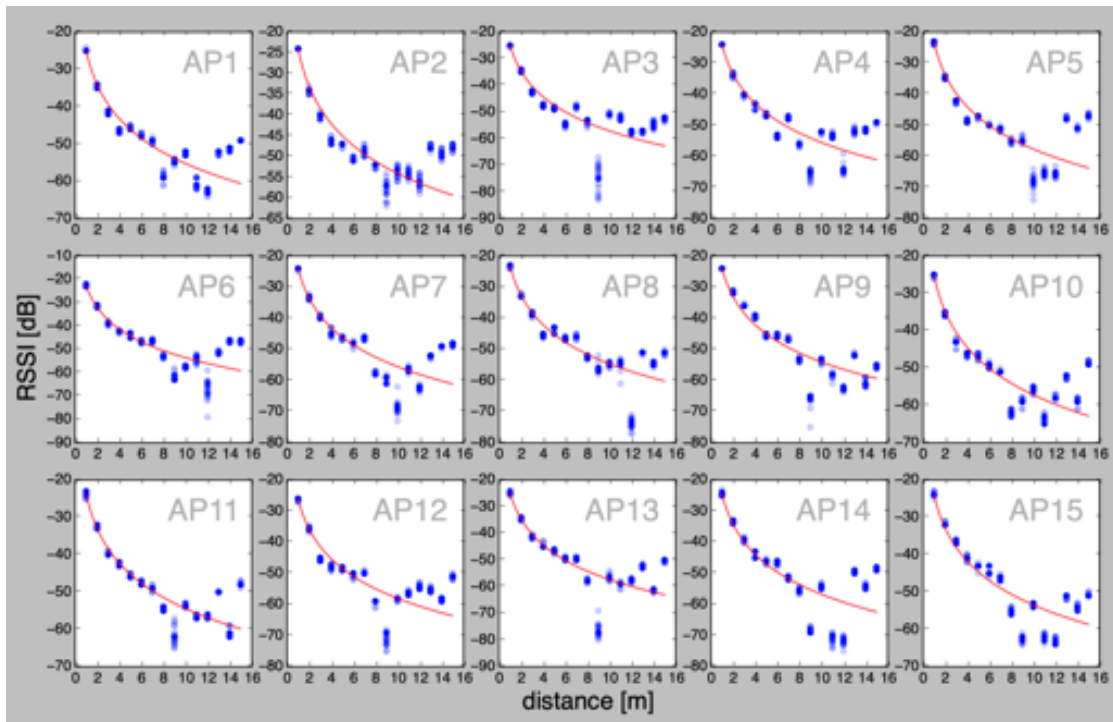
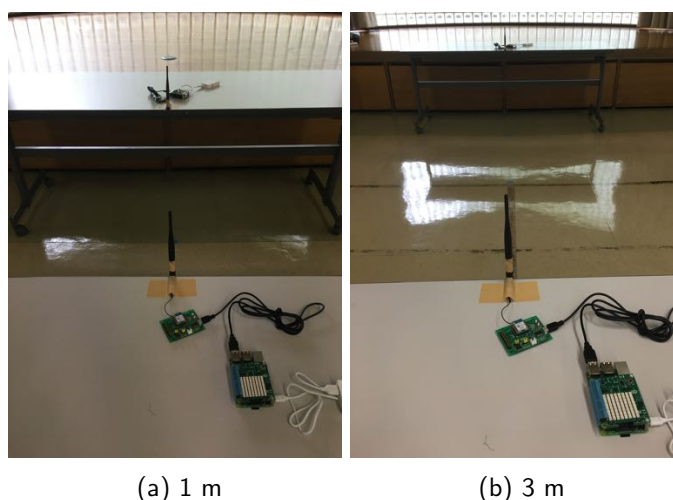


図 5.3: 減衰モデルのフィッティング



(a) 1 m

(b) 3 m

図 5.4: リンク測定の様子 (机使用時)

表 5.3: 机使用時の環境変数

	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5
n	1.944	2.077	2.210	1.944	2.077

環境変数 n について、全ての AP において $n \simeq 3$ となっている。多目的ホールという AP と ED の間に障害物が何もない環境で $n = 2$ とならなかった原因として、LoRa アンテナが床面に近すぎたことが考えられる。アンテナ高が 17cm であるため、床面からアンテナの先端部まで 30cm も距離がない。この考察の検証として、一部の AP に関して行った対照実験とその結果を Table. 5.3 に示す。

Fig. 5.4 のように、高さ 70cm の机に AP と ED を設置した際の n を Table. 5.3 に載せる。このように、アンテナの先端部を床面から 90cm 離れた場合の n は $n \simeq 2$ となった。よって、床面からの高さが環境変数 n に関係している、という考察が正しいことが推測される。しかしながら、運動状態の位置推定を行う際には自律的に動くモノの上に ED を固定する必要があるため、机は適していない。また、AP を設置するモノに関しても、机には幅があり、ED が机の下に潜り込んだ際など、意図しないデータを取得してしまう可能性があるため、ED と同程度の高さに固定することが望ましい。以上のことから、本実験では先述のカゴと *iRobot* を固定台としてそのまま使用する。

また、決定係数とはモデルの回帰式の精度を表す指標であり、最大で 1 となる。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できる。Table. 5.2 から分かるように、本実験における決定係数は 0.56~0.85 であり、RSSI の距離に対する減衰モデルを高い精度で近似できていることがわかる。よって、今後の計算では n について Table. 5.2 の値を用いる。

位置推定の実験として、Target 端末を特定の位置に固定してデータを受信する静的な位置推定と、Target 端末をランダムに動かしながら一定間隔でデータを受信する動的な推定の 2 パターンを行った。本実験における推定誤差の許容範囲は 3m とする。これは、市販されている動物行動調

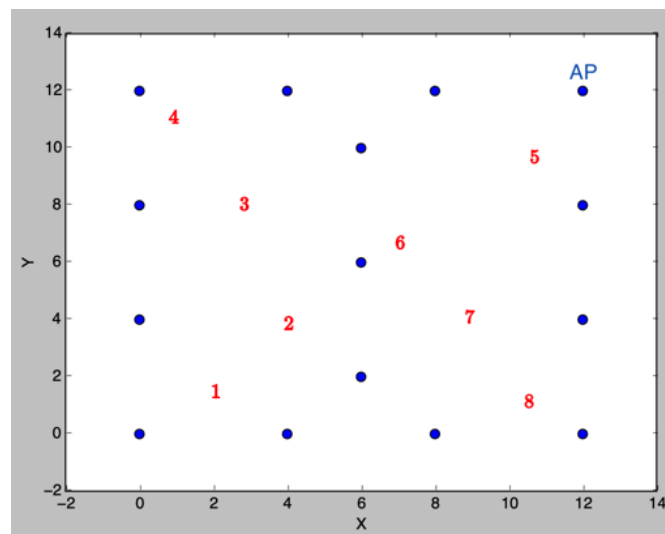


図 5.5: AP の配置図

査用テレメトリー発信器³が天空の開けた場所において約 3 m の GPS 測位誤差を含んでいることから、同様の対象・環境で使用することを想定した提案手法においても同程度の許容範囲として設定した。

5.1.1 固定状態における位置推定

ホールに AP を 15 個設置し、ED も計 8 箇所固定設置して (Fig. 5.5) 位置推定を行った。

推定において、測定したデータを一度に全て使用するのではなく、使用する送信元 AP の個数を 4 個から 15 個の間で 1 個ずつ増やすことによって、どの程度の個数で推定の精度が頭打ちになるのかを調べた。その際、使用する AP は信号強度が強い順に選択した。これは、Fig. 5.2 に示すように、距離が近いほど信号強度のばらつきが小さく、強い値で取得できているため、AP と ED 間の距離に関して信頼性が高いと判断したからである。加えて、本来の推定は ED の位置情報に関して未知の状態で行う必要があり、ED から得られる情報は各 AP から受信したデータの信号強度のみであるからである。

全ての AP は 5 秒ごとにデータを ED に向けて送信し、ED は各測定場所において 5 秒間受信スロットを開いた。受信したデータの信号強度から式 (4.10) を用いて擬似距離を導出し、??章で説明した観測方程式によって位置推定を行った。Fig. 5.6 は、推定した位置座標とメジャーで測定した真の座標との誤差 [m] を推定に使用した AP の個数を横軸として場所ごとにグラフ化したものである。

Fig. 5.6 から、単純に AP の個数を増やすほど精度が劇的に向上していくわけではないが、必ずしも一定の個数で頭打ちになるわけでもないことがわかる。しかしながら一方で、AP の数が少ない場合、解が求まらないケースが確認された。推定に使用する観測方程式では、式 (4.4, 4.5) に示す

³CIRCUIT DESIGN,INC. 動物行動調査用テレメトリー発信器 - <https://www.tracking21.jp/support/faq/>

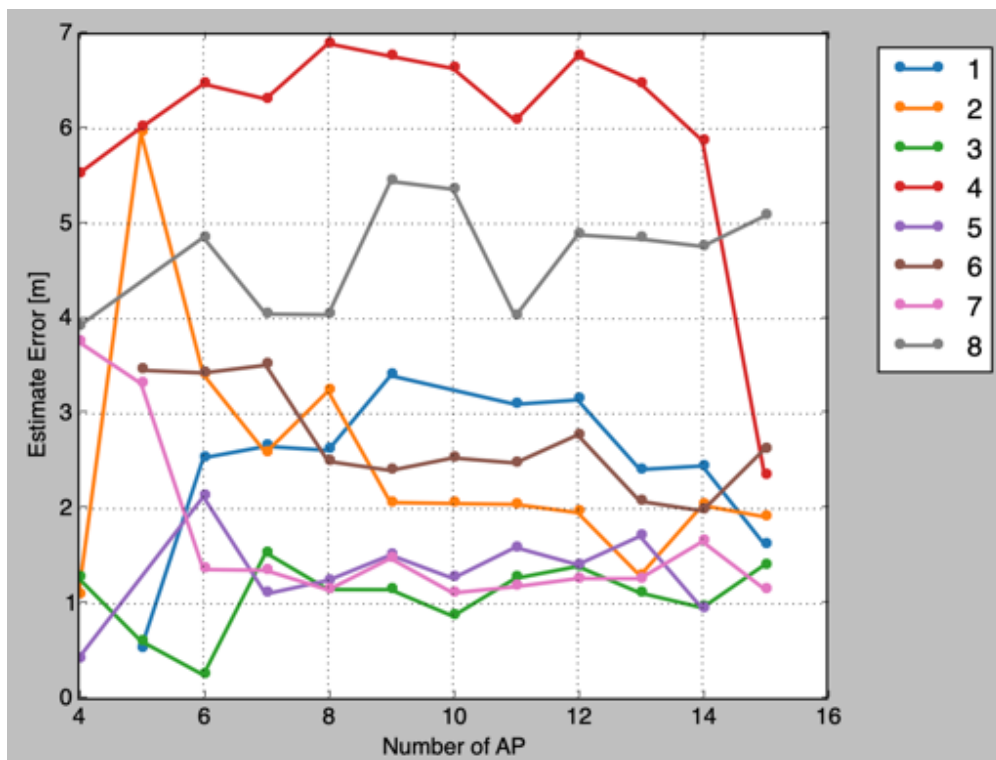


図 5.6: 固定状態における推定誤差 (m)

ように、逆行列を扱う必要がある。 ΔX を十分に小さくするための反復中に行列 $A^T A$ がランク落ちしてしまった結果、逆行列が求められなくなったことが原因であった。また、解が一意に収束しない場合があることや AP の数を増やす途中で精度が落ちてしまう原因に関して、ED と推定に使用した AP の位置関係を調べたところ、AP を結んでできる多角形の外側に ED が位置しているパターン (Fig. 5.7a) や、ある 1 つの AP だけが遠く離れた場所に位置しているパターン (Fig. 5.7b) が確認できた。まず、AP が作る多角形の外部に ED が位置するパターンについて、推定を行う際の初期位置によって解が大きく左右されることがわかった。しかしながら、本来 ED の位置座標は未知であるため、適切な初期位置を設定することは不可能である。そのため、AP と ED 間の距離に対して重み付けをするなど、別の解決策を考える必要がある。次に、遠くの AP を採用してしまったパターンについて、Fig. 5.3 に示すように、多くの AP において、距離 8 m 以降で実際に取得した信号強度とモデルの回帰曲線が一致していない。特に 6 m 付近と 14 m 付近で受信したデータの信号強度に差がない AP が多く、観測した信号強度から近い距離に位置していると誤って判断された結果、遠くの AP を選択し、推定誤差も大きくなってしまったと考えられる。以上の 2 パターンの比較対象として、理想的な AP の選択ができていないパターン (Fig. 5.7c) を確認する。このパターンは、常に解が安定して、かつ、誤差も最大 1.5 m (Fig. 5.6, No.3) と許容範囲内であることから、適切な AP の選択が推定において重要な要素であることがわかる。

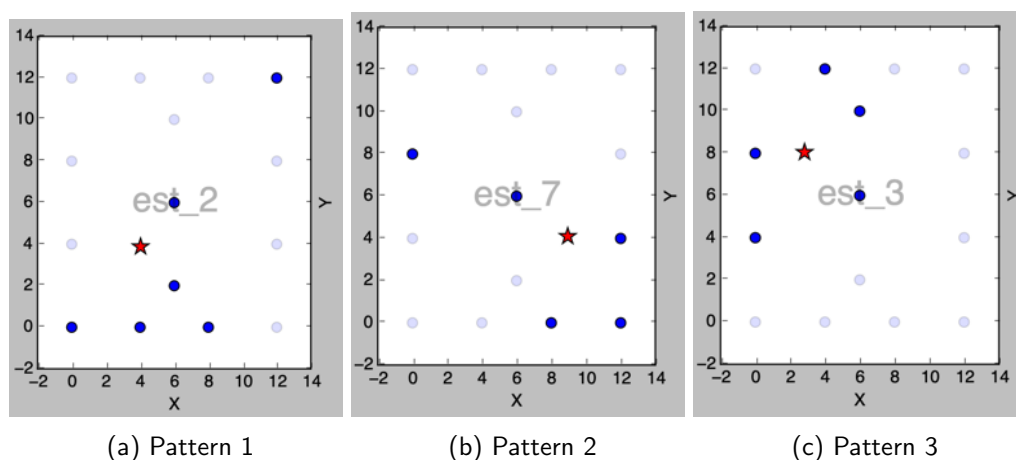


図 5.7: AP と ED の位置関係の例

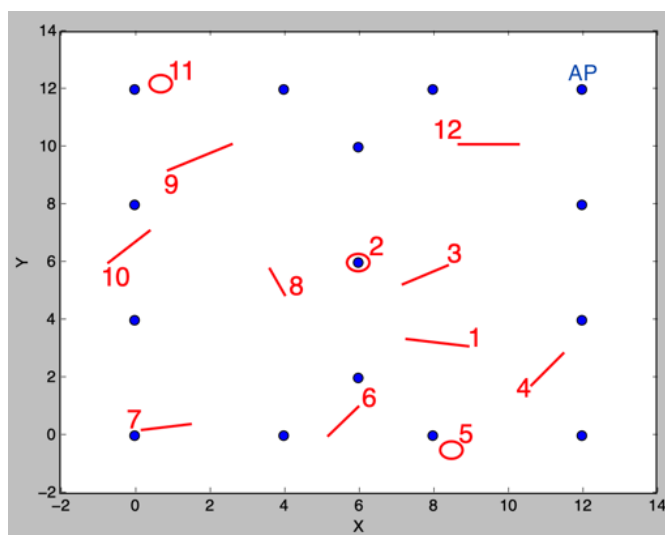


図 5.8: 移動の軌跡

5.1.2 運動状態における位置推定

AP は 5.1.1 節の実験と同じ位置に 15 個設置し、ED に向けて 5 秒ごとにデータを送信し続けた。一方で、ED は *iRobot* に固定し、多目的ホール内をランダムに走行させた。走行中に 5 秒間だけ *LoRa* を受信モードにして AP からのデータを受信し、その際の信号強度から位置推定をすることを計 12 回行った (Fig. 5.8)。ここで、*iRobot* の走行速度は最大で 50 cm/s であるため、受信スロットを開放している 5 秒間での最大移動直線距離は 2.5 m となる。実際のユースケースにおけるデータの欠損などを考慮して、各測定において同一 AP から 1 度しか受信しないように送受信間隔を設定し、最も誤差の生じやすい条件で実験した。

運動状態における推定誤差は、ED が移動した線分または円弧から推定した位置座標までの最短

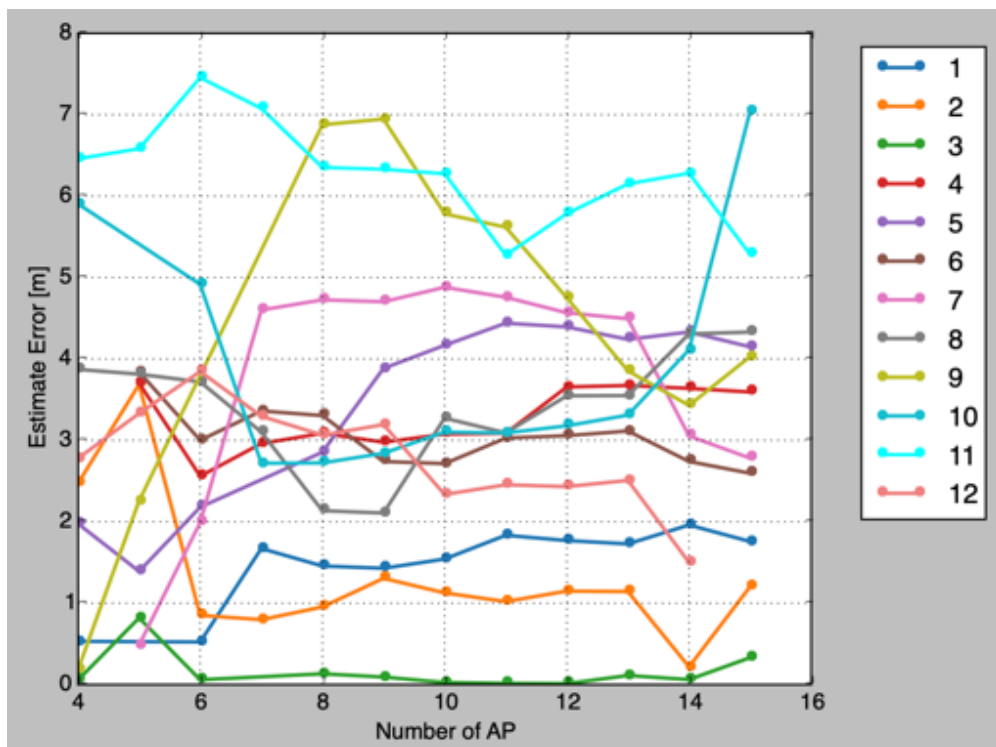


図 5.9: 運動状態における推定誤差 (m)

距離とした。実験中は電波の障害とならない場所でEDを動画撮影し、実験終了後に動画をもとにEDがデータを受信していた位置座標を確認した。そのため、真の位置座標には ± 20 cmほどの誤差が含まれている可能性がある。Fig. 5.9は、推定した位置座標と動画から取得した真の座標との誤差 [m]を推定に使用したAPの個数を横軸として場所ごとにグラフ化したものである。

Fig. 5.9から、EDが運動状態であっても多くの受信位置において推定誤差が3m前後となっていることがわかる。5.1.1節とは受信する場所が異なっているため正確な比較はできないが、最大推定誤差に関しても固定状態と比べて50 cmほどの違いしかない。

Fig. 5.9について推定誤差が4m以上になったものを確認すると、その全てが測定エリアの端をEDが移動している時の推定結果である。これらの位置は5.1.1節で考察したFig. 5.7aの状態になる可能性が非常に高い位置であり、誤差が大きくなってしまふことは妥当である。一方、推定誤差が2m以下となった場所を確認すると、測定エリアの中央部で推定したものであることがわかる。この位置はFig. 5.7cの状態になりやすく、適切なAPを選択しやすかったことがわかる。本実験では先に述べた通り、それぞれのAPからのデータ受信位置に最大2.5mの距離がある。そのため、1度の測定で同一APから複数回受信できるようにした場合に精度向上の余地がある。以上の実験結果から、運動状態においても固定状態と同程度の推定精度を期待できることがわかった。

実験の結果から、本手法の実現可能性は十分にあることが確認された。

表 5.4: 実験パラメータ (アリゾナ)

Spreading Factor	7
Band Width	125 kHz
Effective Bitrate	5469 bps
Transmission Interval	5 sec
Reception Time	100 sec

5.2 屋外フィールドにおける LoRa のカバレッジ検証

5.1 節でシステムの実現可能性を確認できたため、本節では屋外においてどの程度の範囲でシステムを適用できるかを考察するためのカバレッジ検証を行った。また、それと同時に障害物の有無や設定パラメータの違いによってどの程度パケット到達率が異なるのかを調査した。実験を行ったフィールドは Arizona 州 Tucson, Bowie に位置する東京大学生産技術研究所保有のピーカンナッツ農場であり、広さは一区画 800 m × 800 m である。この農場はセンサで土壌データなどを取得しているが、ピーカンナッツという大きな障害物の影響で携帯回線では農場の外の基地局にデータを送信することができず、定期的に現地に行ってデータを回収しなければならないという問題を抱えている。そこで LPWA を使った問題解決の可能性の検証に加え、植えてあるピーカンナッツの成長具合によって異なる環境を用意できること、農作業を行いながらセンサの情報を収集するなど動物だけでなく農業機械に取り付けることによる本システムの農業への利用可能性を考え、フィールドをこの農場に設定した。

5.2.1 実験概要

調査区画の端に送信端末 (センサ⁴と *Raspberry pi Model 3+*, *LoRa* /Fig.5.10a) を高さ 1.5~1.6 m の枝または三脚に設置し、センサで取得した気温と湿度のデータを一定の間隔で受信端末に送信し続けた。一方で、受信端末 (mac book を持った筆者 /Fig.5.10b) は一定距離ごとに一定時間受信スロットを開いて待機した。その際、本来届くはずのデータ数と比較してパケット到達率を測定するとともに、受信したデータの信号強度を取得し距離との関係性を調査した。さらに、受信できた気温と湿度のデータをリアルタイムでグラフに描画し保存した (Fig.5.10c)。これらの基本設定を Table.5.4 に示す。

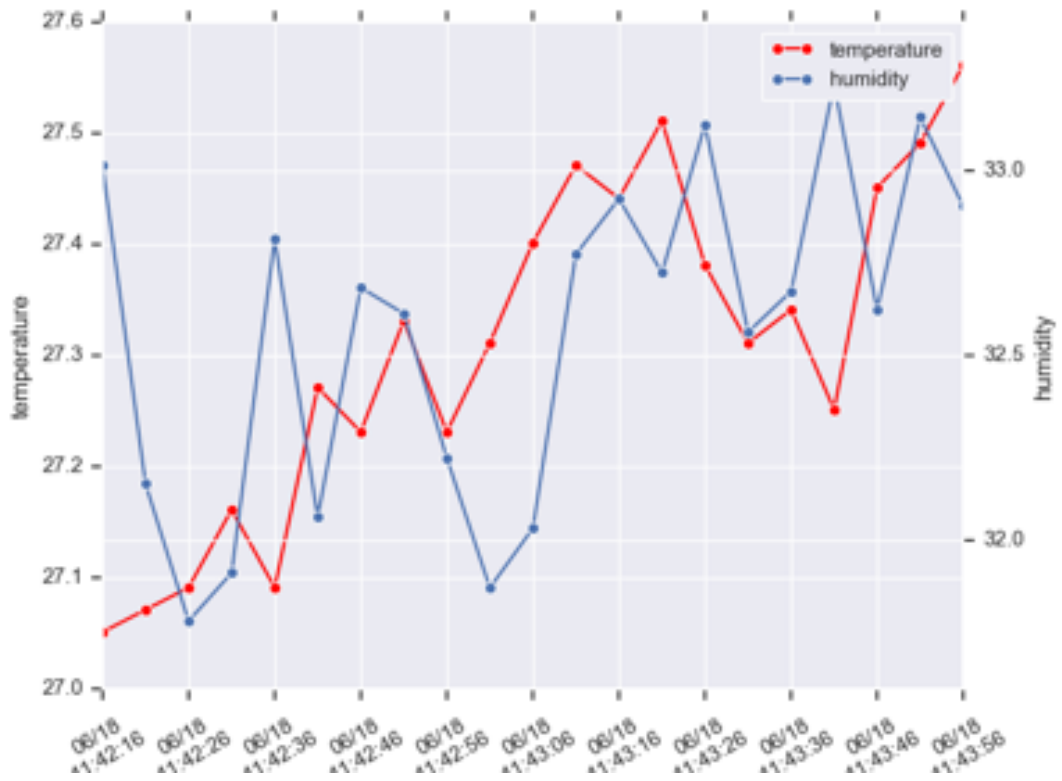
なお、この実験において重要なのはセンサデータの取得値の正確性ではなく *LoRa* の通信可能距離や距離ごとのデータ到達率を調べることであるため、取得値が正しいかの調査は行っていない。

⁴Sense HAT - <https://www.raspberrypi.org/products/sense-hat/>



(a) 送信端末

(b) 受信端末



(c) 受信データのリアルタイム描画

図 5.10: 実験の様子 (アリゾナ)

5.2.2 環境 (障害物) の考察

先に述べた通り、このピーカンナツ農場では苗木の成長具合に応じて様々な環境が存在する。そこで今回は以下の3パターンの環境において *LoRa* のカバレッジ性能を調査した。

- 見通しの良いひらけた道路
- 高さ 4,5 m 程度の幼木が立ち並んでいる区画
- 高さ 10 m 以上の成木が立ち並んでいる区画

見通しの良いひらけた道路

障害物が全くない環境 (Fig.5.11) における実験結果を Fig.5.12 に示す。送信端末と受信端末間の距離が 800 m までの時は Fig.5.11a で実験を行っていたが、それより長い距離を確保するのが困難であったため、1.6 km 付近のデータを取る際には Fig.5.11b の環境へ場所を移して行なった。この時の *LoRa* の設定は Table.5.4 の通りである。

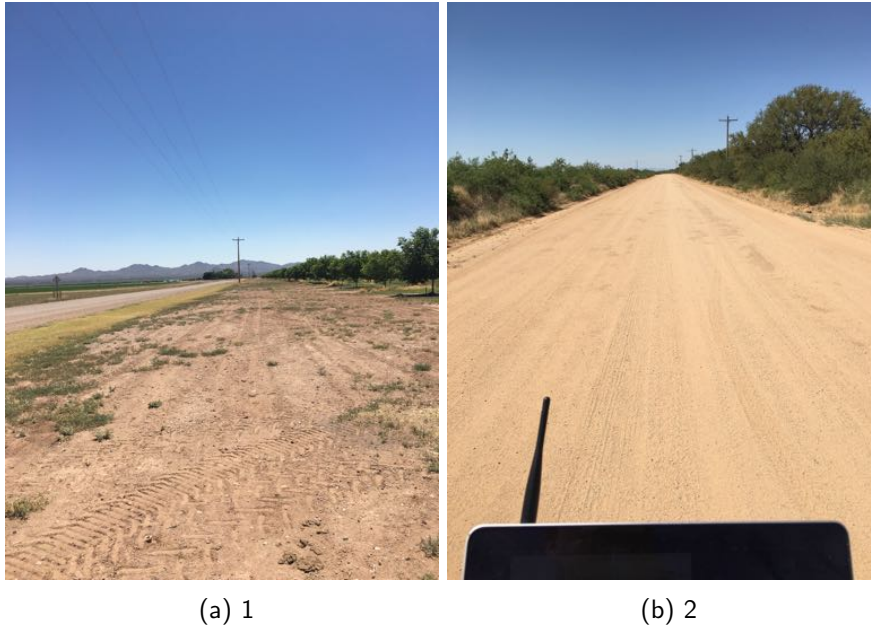
Fig.5.12 から見て取れる通り、800 m 付近まではパケット損失も生じず、信号強度も -120 dB よりも大きくなっている。一方で、距離を 1.6 km 付近まで伸ばした場合、パケット損失率は 40 % となり、信号強度も -130 dB から -110 dB となっている。このことから、Table.5.4 の設定において、信号強度の -120 dB がパケット損失の生じ始める閾値として扱うことができると考えることができる。

ここで、パケット損失率について、通信事業者が満たすべき IP ネットワークの国際標準企画 [34] によると上限は 0.1 % とされており、KDDI のサービス品質保証 (SLA) では「国内拠点ネットワークのパケット損失率を 0.3 % 以下で維持」とされている [35]。しかしながら、本研究で提案しているシステムは少しのデータ損失も許されないようなものではなく、必ずしも通信を成功させる必要はない。さらに、車車間通信・路路間通信においては許容値を 10 % 以下と設定していた [36] ことから、適用するシステムや環境に応じた評価が必要であり、本システムにおけるパケット損失率の許容値は現段階で設定することはできないが、本節の実験においては暫定的にこの 40 % を閾値として扱うこととする。

高さ 4,5m 程度の幼木が立ち並んでいる区画

次に多少の障害物がある環境 (Fig.5.13) における実験結果を Fig.5.14 に示す。この環境について、Fig.5.13 の手前から奥方向には向かって 800 m の間に 124 (+1) 本の苗木が植えられており、苗木間の距離は 6.5 m 前後となっている。一方で左右方向の間隔は 11 m 程度あるため、より障害物の影響を大きく受ける手前奥方向で実験を行なった。またこの時、苗木間の通路部分でデータの送受信を行なってしまうと障害物の意味がなくなってしまうため、連続している苗木の側で送信端末と受信端末の間に障害物を挟むようにして実験を行なった。この時の *LoRa* の設定も Table.5.4 の通りである。

Fig.5.12 の結果と比較して障害物が追加されたことによって全体的に受信した際の信号強度の値が低くなっていることがわかる。また、先ほど**見通しの良いひらけた道路**で考察した通り、信号強



(a) 1

(b) 2

図 5.11: 見通しの良いひらけた道路

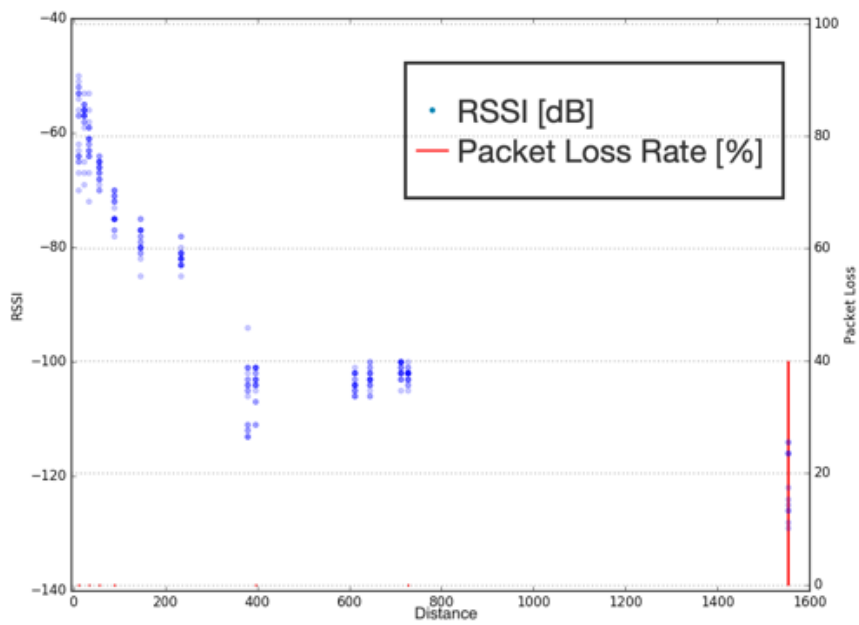


図 5.12: 見通しの良いひらけた道路における距離ごとの RSSI のばらつき



図 5.13: 多少の障害物がある環境

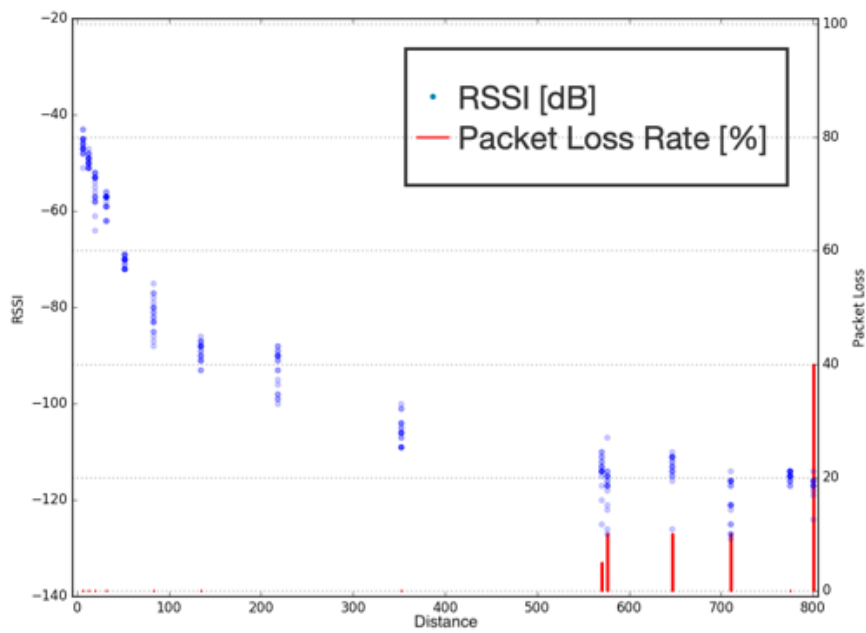


図 5.14: 多少の障害物がある環境における距離ごとの RSSI のばらつき

度が -120 dB を下回った距離 (550 m 以降) においてパケット損失率が上昇している。しかし、パケット損失は生じたものの、ある程度の視界を確保できる環境 (Fig.5.13b 参照) では区画の端から端まで問題なく通信することが可能であった。

表 5.5: 拡散率とビットレート (バンド幅 = 125kHz)

Spreading Factor	7	8	9	10	12
Bit Rate (bps)	5469	3125	1758	977	293

高さ 10m 以上の成木が立ち並んでいる区画

最後に多くの障害物が存在する環境における拡散率を7とした時の実験結果を Fig.5.16 に示す。この環境が本節の冒頭で述べた携帯回線が届かないという問題を抱えた区画である。苗木間の距離や実験位置は**高さ 4,5m 程度の幼木が立ち並んでいる区画**と同様であるが、ピーカンナツが大きく成長しているため Fig.5.15a の手前奥方向には枝葉が生い茂り、左右方向の見通しもかなり悪くなっている。

350 m 以降で Fig.5.14 の時よりもさらに信号強度が低下していることがわかる。さらに受信した信号強度が -120 dB を完全に下回り、平均信号強度が -130 dB 付近になるとパケット損失率も非常に高くなっていくことがわかる。また、700 m 以降になると完全にパケットが到達しなくなっている。

そこで、パケットの伝送距離を伸ばすために *LoRa* のパラメータ、具体的には拡散率 (*SF*) を変更して再実験を行なった。

5.2.3 拡散率の考察

まず、*LoRa* の拡散率について確認する。3.3.1 項の **PHY features** で解説した通り、*LoRa* の変調方式には *CSS* (*Chirp Spread Spectrum*, チャープ・スペクトラム拡散) を採用している。この *CSS* 変調は、搬送波の振幅が一定である。代わりにその周波数をリニアに減少させることがデジタル情報の 0 に相当し、増加させることでデジタル情報の 1 を表す。スペクトラム拡散では、拡散率をあげると受信時の逆拡散処理の影響で信号対がその分改善され、干渉や雑音に対して耐性が増えて信号到達距離が伸びる。一方で、拡散率を上げるということは送信したいデータの送信速度を遅くすることに対応するので (Fig.5.17)、スループットが低下するという相関関係も存在する (Fig.5.5)。

これらを踏まえて、**高さ 10m 以上の成木が立ち並んでいる区画**でパケット損失が多くなった距離 (450 m 以降) について拡散率を増加させて実験を再び行なった。そしてその実験結果が Fig.5.18 である。送信間隔と受信時間は Table.5.4 と同じであるため、一箇所で受信しうる信号数は変わらず 20 回である。

それぞれの図を比較してわかるように、拡散率を大きくすることによってパケット到達距離が改善していることがわかる。SF7 では多くの距離において半分以上のパケットが届かず、700 m を超えた時点でパケットは全く届かなくなってしまうが、SF8 の場合では 750 m 付近まで 30% 以下の損失率を維持できている。さらに拡散率を 9, 10 と大きくするにつれて 750 m 付近までの損失率は改善し、最後の 800 m 地点への到達率も大幅に改善された。

また各距離における信号強度についても、拡散率を大きくすることで増えていくことが確認できる。値自体が改善されているだけでなく、受信可能となる信号強度にも変化が現れている。具体的



(a) appearance



(b) scale



(c) view

図 5.15: 大きな障害物がある環境

に、高さ 10m 以上の成木が立ち並んでいる区画で見た通り、SF7 の時は信号強度が -120 dB を完全に下回り、平均信号強度が -130 dB 付近になるとパケット損失率は非常に高くなっていたが、SF8 以降では多くのパケット伝送に成功している。特に SF10 の時は平均信号受信強度が -135 dB になっても伝送に成功していることがわかる。しかし、SF10 までの結果を見ると、800 m 地点には届くようになっているにもかかわらず、760 m 周辺に受信しにくいポイントがある。これは障害物の非常に多い環境において、あらゆる場所で電波は反射・吸収された結果、反対の位相の波との打ち消し合いなど電波伝搬特性の影響を最も受けたポイントであると考えることができる。

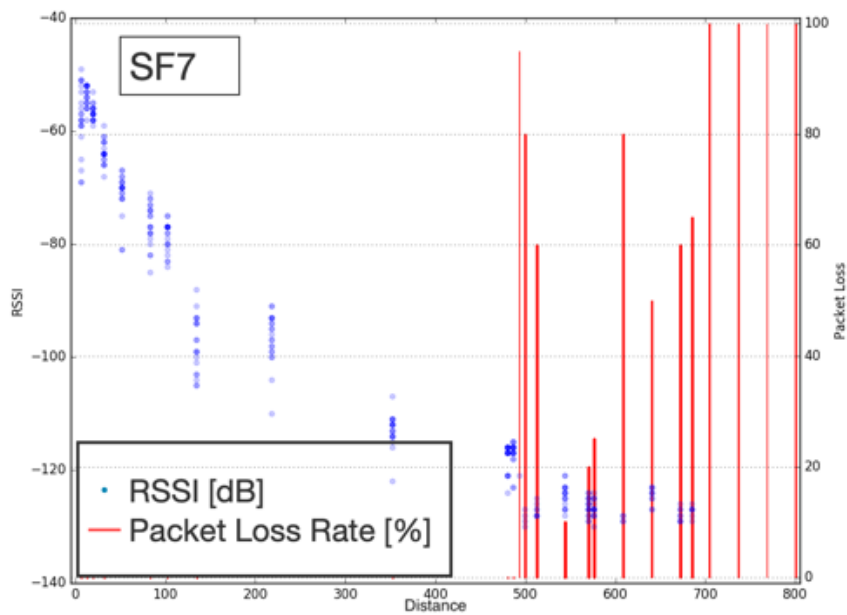


図 5.16: 大きな障害物がある環境における距離ごとの RSSI のばらつき (SF7)

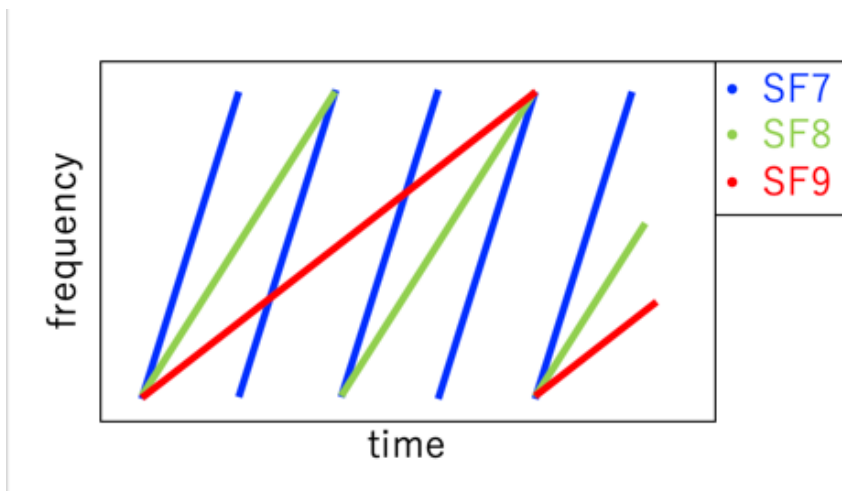


図 5.17: CSS 変調における時間と周波数の関係

そこで、SF12では距離ごとの受信回数を5倍・25倍と大幅に増やし (Table.5.6), より詳細なパケット損失率の調査を行なった。その結果を Fig.5.19 に示す。760m 周辺以外では損失率は15%を下回っているが、762m 地点では98.0%を損失している。このことから、760m 周辺は先ほど述べたように電波伝搬特性の影響を最も受けやすく、拡散率の変更では受信状況が改善しない特殊なポイントであることがわかる。また、SF12 (最大) とすると平均信号強度が-140 dB でも受信可能となっていることがわかる。

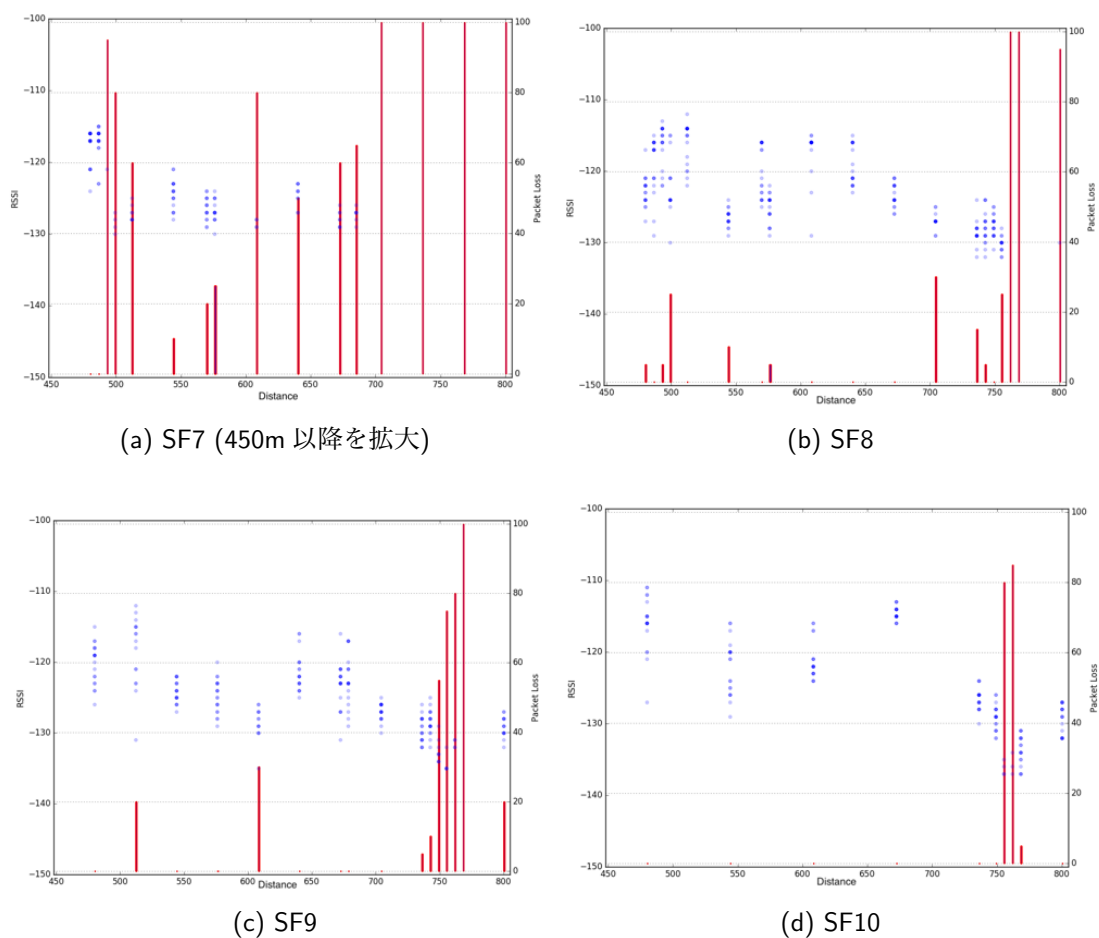


図 5.18: 大きな障害物がある環境における距離ごとの RSSI のばらつき (SF7~10)

表 5.6: SF12 におけるパケット損失率の詳細

Distance (m)	480	544	576	608	672	736	755	762	768	800
The number of transmissions	100	100	100	100	100	100	500	500	100	100
Packet Loss Rate (%)	6.0	2.0	0	0	0	13.0	24.8	98.0	51.0	8.0

拡散率を最大にすると大きな障害物が多い環境でも 800 m 程度であれば運用できることが確認できた。

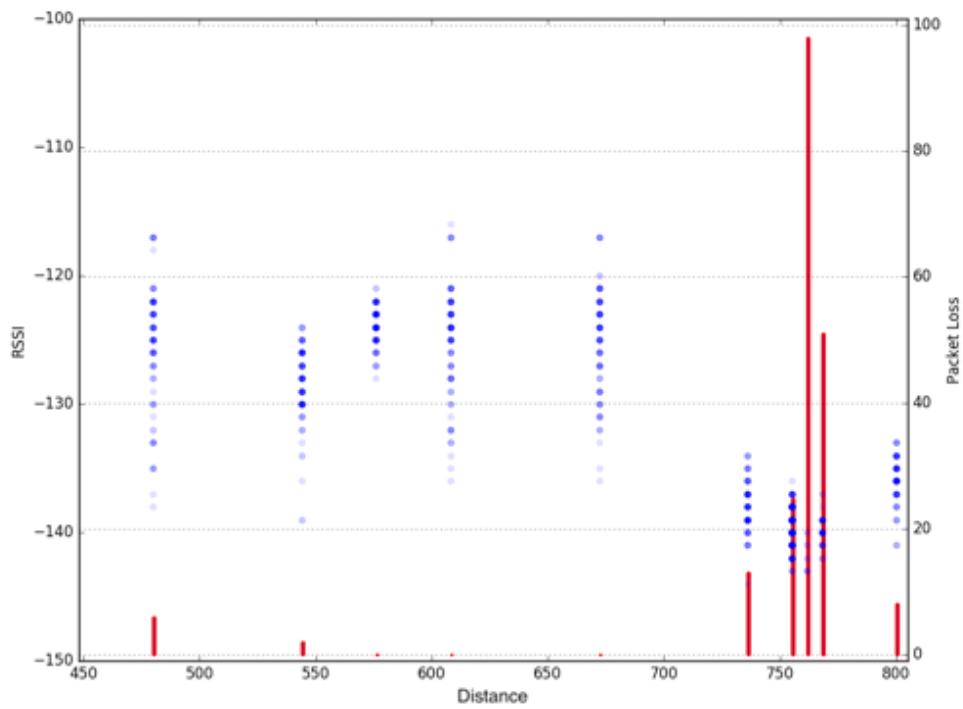


図 5.19: 大きな障害物がある環境における距離ごとの RSSI のばらつき (SF12)

表 5.7: 実験エリアの詳細

East to West	480 m
North to South	590 m
Difference in height	273 m
Slope	26°~62°

5.3 実環境を想定した屋外フィールドにおける提案手法の検証

5.2節の検証によって、環境ごとに電波を受信しにくいポイントが出現する可能性があるものの、800 m 程度の範囲であればシステムが動作可能であることが確認できた。そこで本システムの運用を想定している環境の1つである森林にて位置推定の精度を調査した。実験は東京大学保有の秩父演習林にて行った。秩父演習林は奥秩父山地に位置し、東京大学農学部の冷温帯地域における教育試験研究施設として1916年に設置されたものである。関東山地中央部の荒川源流域に位置しており、荒川の浸食によって溪谷が形成されているなど、全体的には典型的な山岳地形となっている。実験をするにあたって、山道がある程度整備されており実験が行いやすいことに加えて、本システムの運用環境に非常にマッチすることからこの演習林を実験フィールドに選択した。

5.3.1 実験概要

実験エリア (Fig.5.20, 国土地理院地図より) の地形データを Table.5.7 に示す。

この範囲の道沿いに送信端末を10個設置し (Fig.5.21), 受信端末は実験内容に応じて道中の複数箇所を受信を試みた。送信端末は高さ127 cmの三脚に取り付け (Fig.5.22a, 5.22b, アンテナ含めると133 cm), 受信端末からの Beacon を受信した時に受信端末に向けてデータを送信する設定とした。受信端末は高さ72 cmのスーツケースに取り付けた (Fig.5.22c, アンテナ含めると88 cm)。これは、本節では多方向からデータを受信することになるため、5.2節の実験のように筆者が端末を持つことによって筆者自身が端末の近い位置にある障害物になってしまうことを避けるためである。本節では LoRa の拡散率を最大の12として実験を行った。

5.3.2 座標変換

本実験における端末の位置情報は GARMIN の GPS (eTrex 20j) によって取得した。送信端末を設置した場所や信号を受信した場所の情報を GPS で取得したのち、国土地理院地図によって位置を確かめたため、最大で5 m 程度の誤差が生じている可能性がある。

この GPS では位置情報が緯度経度で得られるので、この後に行う位置推定用に三次元座標へと変換する必要がある。その一般的な手法を本項で紹介する。大きな流れとしては**測地座標系から ECEF (地球中心・地球固定) 直交座標系へ変換し、その後 ECEF 直交座標から地平面座標に変換する** [37]。



(a) Map1



(b) Map2

図 5.20: 実験エリア (秩父演習林)



図 5.21: 固定センサの配置図



(a) 固定センサ (全体図)

(b) センサなど (中身)

(c) 動物に見立てた受信端末

図 5.22: 実験道具 (秩父演習林)

測地座標系から ECEF 直交座標系

地球の中心を原点 $(0, 0, 0)$ とした時, 任意の座標は (x_p, y_p, z_p) と表すことができ, これを ECEF (地球中心・地球固定, Earth Centered, Earth Fixed) 直交座標と呼ぶ. 次に地球の形状に近似し

semimajor axis (a)	6,378,137 m
oblateness (f)	1/298.257223563

た回転楕円体を考える。長半径 a と扁平率 f が Table.5.8 のように与えられている時、それらと短半径 b や離心率 e の関係は以下の式のように表すことができる。

$$e = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}}{a}$$

$$f = \frac{(a - b)}{a}$$

ここから緯度 (ϕ) 経度 (λ) 高度 (h) を用いて先の ECEF 直交座標を表したものが測地座標である。これらの座標は相互に互換可能であり、 (ϕ, λ, h) が与えられた時、 (x, y, z) は

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

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

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

のように計算することができる。ここで、

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\phi}}$$

$$e^2 = 2f - f^2$$

である。

ECEF 直交座標から地平座標

ECEF 直交座標は地球の中心が原点であるため、自分中心の座標系 (地平座標) に直した方がわかりやすい。ECEF 直交座標から地平座標への変換は回転と原点移動によって行うことができる。ある直交座標の軸を中心として回転を行った時、もとの座標 x と回転後の座標 y の関係は行列 R を用いて

$$y = Rx$$

⁵理解するための GPS 測位計算プログラム入門 (その 1) WGS84 と座標変換のはなし [37] から引用

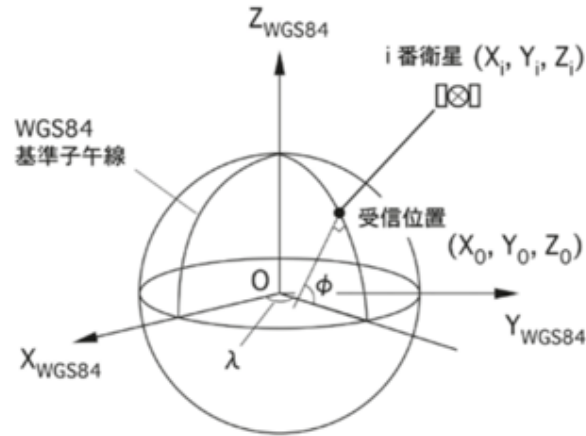


図 5.23: 測地座標と ECEF 座標⁵

と表すことができる。ここで行列 R に関して、回転軸を α 、回転角を反時計回りに θ とおいて $R(\alpha, \theta)$ と表すと

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

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

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

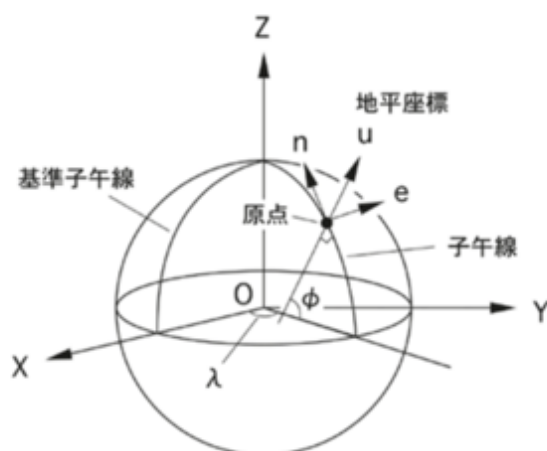
となることを利用すると、地平座標 (e, n, u) は ECEF 直交座標における位置 (x, y, z) と新たに設定する原点 (x_0, y_0, z_0) を用いて

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

と求めることができる。

Python 環境では緯度経度座標から平面直角座標へと変換できる `pyproj` というライブラリが存在する。これを利用する場合、実験場所が秩父であるので緯度経度座標の世界測地系 JGD2000 は EPSG4612、平面直角座標は 9 系の EPSG2451 となる。

位置推定に関して、これら 2 つの方法で推定精度は変わらないことを確認している。

図 5.24: ECEF 座標と地平座標⁵

5.3.3 リンク測定

まず、式 4.10 における環境変数 n を求めるためにリンク測定実験を行った。実験エリアの上部にある送信端末⑩を起点として、下部の①方向へと下りながら計 13 箇所で測定した。1 箇所につき 30 回信号を受信した結果と、距離と信号強度の関係から得られた n を元に導出した回帰式のグラフを Fig.5.25 に示す。今回、環境変数 n を求める際に 30 回 \times 13 箇所のデータに対して Python ライブラリの `scipy.optimize.curve_fit` を適用している。

図中の score は回帰式の決定係数を表している。決定係数は 0.72 となっており、5.1 節の Table. 5.2 と比較しても同程度に高い精度で減衰モデルを近似できていると言える。

環境変数 n について、5.1 節では用意した端末ごとに求めていたが、Table. 5.2 をみてわかるようにそれぞれに大きな差はない。そのため今回の実験ではすべての送信端末に共通の値として求めた数値を使用した。

5.3.4 位置推定

次に、本システムの要である自然環境における信号強度を利用した位置推定の実験を行なった。Fig. 5.26 に示す 20 箇所で受信側の端末から Beacon をブロードキャストで送信し、その Beacon を受信した送信端末が受信端末に向けてデータの伝送を試みた (Fig. 4.2)。その際、送信端末から伝送された複数のデータが衝突しないように、送信端末ごとにタイミングをずらすように設定した (Fig. 4.3)。細かいシステムの構造は 4.1 節で述べたとおりである。この 20 箇所の受信箇所と Fig. 5.21 に示す 10 個の固定センサとの最大距離は約 635 m である。

4.2 節で示したように、3次元で位置推定を行う場合は 4 個以上の固定座標が必要である。センサは 10 個設置してあるため、これらから受信できたデータのうち信号強度が強い順に 4 個または

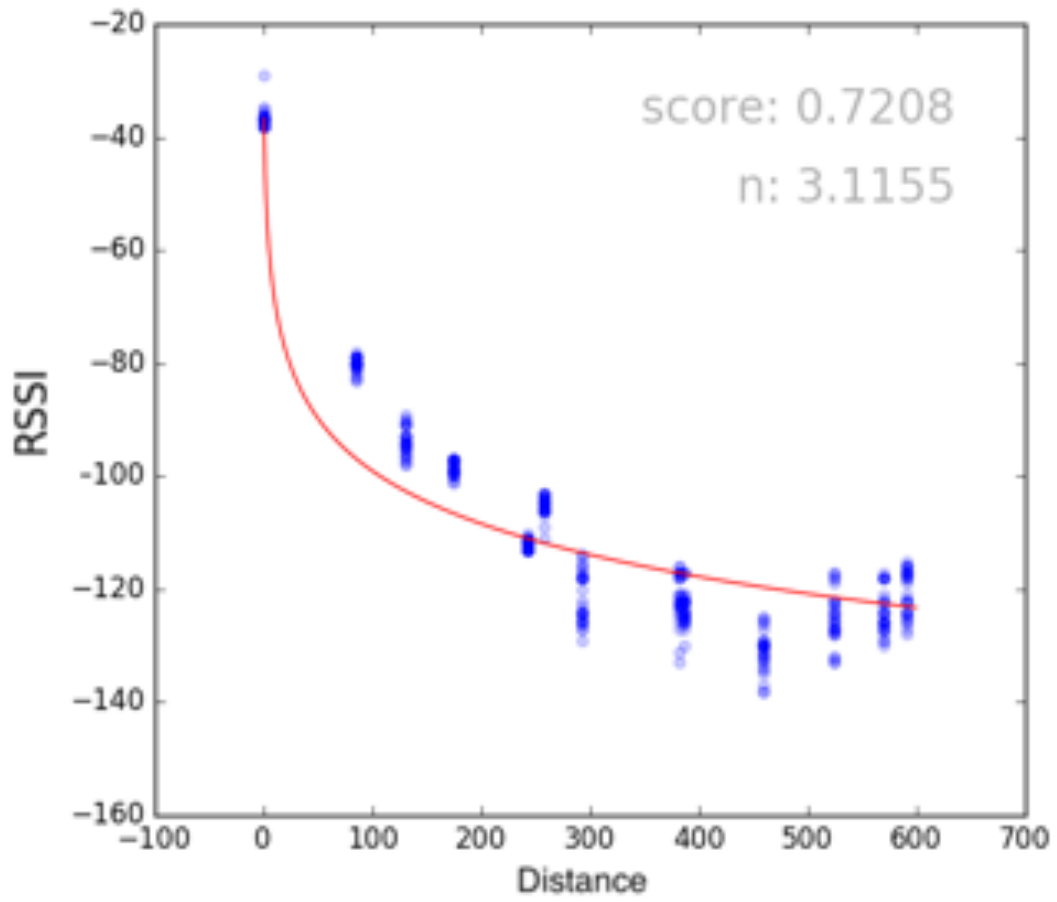


図 5.25: 距離ごとの RSSI のばらつき (秩父演習林)

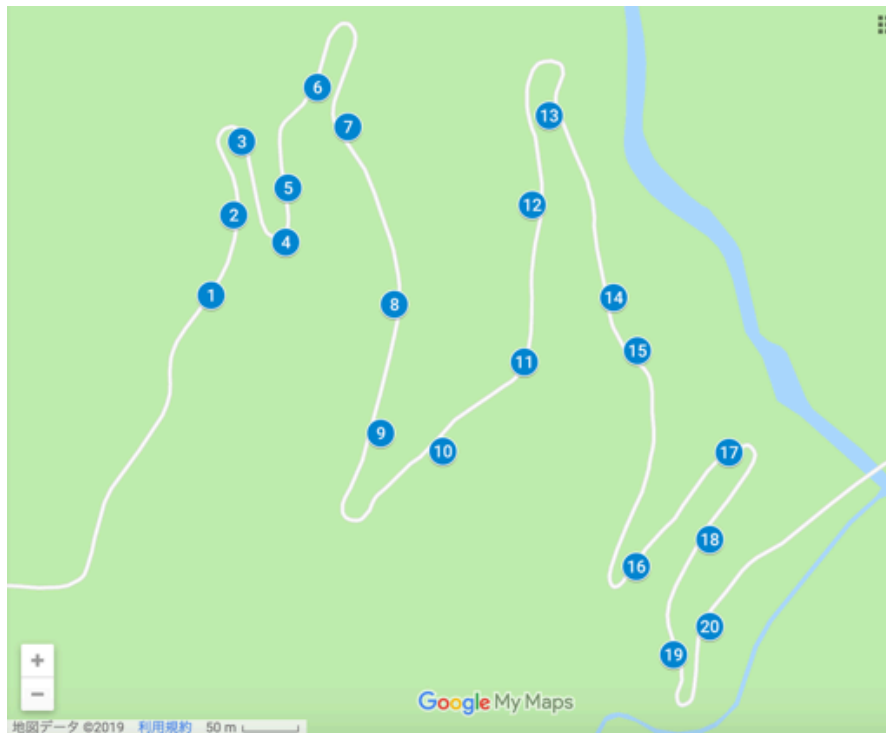


図 5.26: 受信ポイント (真値)

それ以上のセンサを選択し、位置推定のための既知の固定座標として用いた。強い順とした理由は 5.1 節で行なった屋内実験と条件を同じくするためである。

ここで地図を考えた場合、Z 軸方向（天空方向）の誤差は位置推定に影響を与えない。これは 3 章で紹介した関連研究 [24] でも前提となっているため、本研究においても Z 軸は考慮しないものとする。

3 次元での位置推定と地図平面への射影

3 次元で位置推定を行った際の誤差を Fig. 5.27 に示す。それぞれのグラフは、X 軸が推定に使用したセンサの数を、Y 軸が推定位置座標と GPS によって取得した真値座標との誤差を表している。また、それぞれの番号は Fig. 5.26 で示した受信場所に対応している。先の前提の確かさを示すため、天空方向を含めた誤差を青グラフで、含めない（地図平面に射影した）誤差を緑グラフで表している。さらに推定精度の比較用として、最も信号強度が強かったセンサの位置座標と真値座標との距離を赤破線で表している。推定の初期値は最も信号強度が強かったセンサの位置を基準とした半径 10m の球とした。

グラフを見てわかるように、測定場所 20 箇所のうち 11 箇所ではしか位置推定を行うことができなかった。これは屋内実験の際の考察でも述べたとおり、観測方程式の式 (4.4, 4.5) で逆行列を扱う必要があり、 ΔX を十分に小さくするための反復中に行列 $A^T A$ がランク落ちしてしまうことが原因である。加えて今回は 3 次元での位置推定のため、 A が $n \times 4$ の行列となり、2 次元で計算する

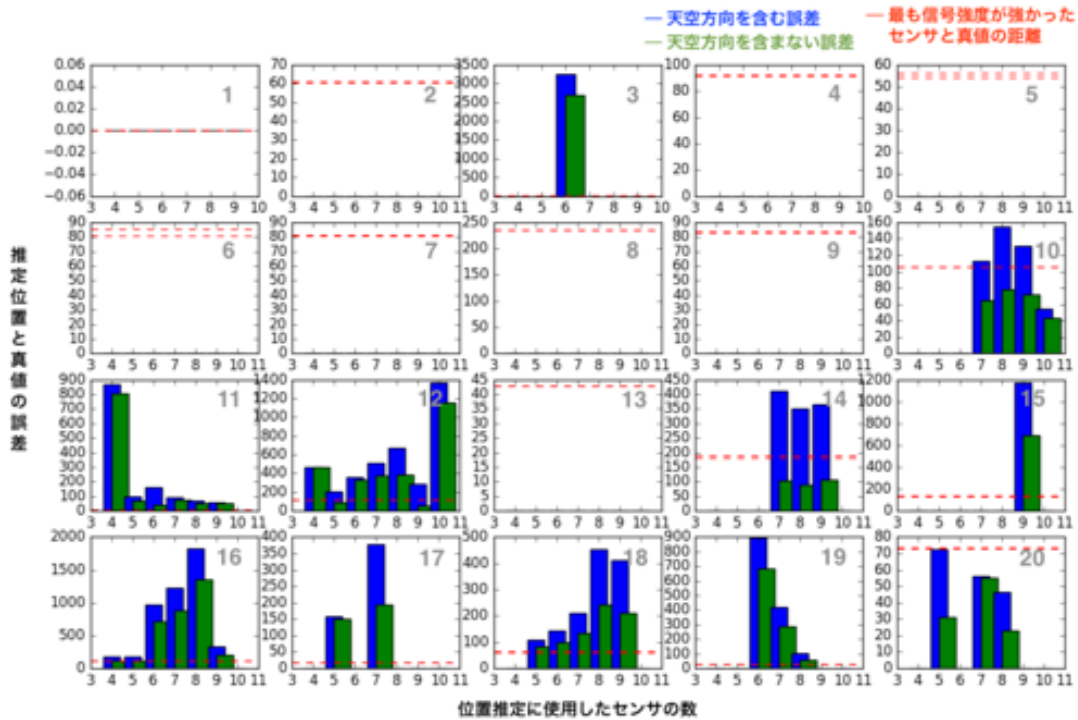


図 5.27: 3次元の位置推定における誤差

ときよりもランク落ちしやすくなってしまふ。推定できた11箇所について、推定場所を地図平面に射影することによって、真値との誤差を減らすことができ、さらに場合によっては $\frac{1}{4}$ 程度まで大きく減らせる可能性があることがわかった。しかしながら、それでもなお、6箇所では誤差が635m以上となった。これは反復計算中に解が収束せず、一定の反復回数で計算を切り上げたことが原因であると考えられる⁶が、本項の冒頭で述べた通り実験エリア内の最大距離が約635mであるため、推定としては全く意味をなさない。また推定結果のほとんどにおいて、最も信号強度が強かったセンサの位置を暫定位置とした方が誤差が小さくなっていることがわかる。

2次元（地図平面）での位置推定

そこで、位置推定を行う際に最初からZ軸（天空方向）を考慮しない、2次元での位置推定について考える。この方法の利点として、観測方程式における行列Aを $n \times 3$ の行列として扱えるようになるため、反復計算中にランク落ちしにくくなることが挙げられる。これに加えて、既知の固定座標が3つあれば位置推定ができるため、3次元の時よりも少ない情報数で推定を行うことができるようになる。

2次元で位置推定を行った際の誤差を Fig. 5.28 に示す。それぞれのグラフは先ほどと同様に、X軸が推定に使用したセンサの数を、Y軸が推定位置座標とGPSによって取得した真値座標との誤

⁶本来多くの場合は10回以内に解が収束する。今回設定した最大許容反復回数は10,000回とした。

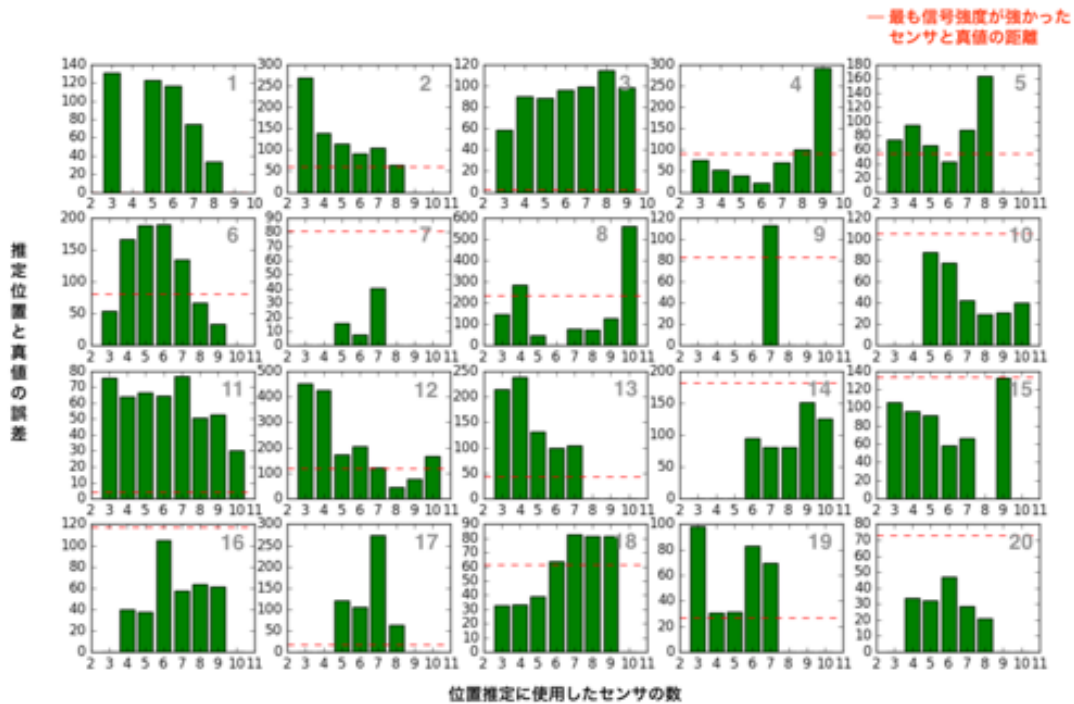


図 5.28: 2次元として扱った場合の位置推定における誤差

差を表している。また、それぞれの番号は Fig. 5.26 で示した受信場所に対応している。さらに、最も信号強度が強かったセンサの位置座標と真値座標との距離を赤破線で表している。推定の初期値は最も信号強度が強かったセンサの位置を基準とした半径 10m の円とした。

Fig. 5.27 と比較すると分かるように、2次元として扱った場合の方がより多くのパターンでの推定に成功している。加えて、個々の推定結果についても格段に誤差が小さくなっており、結果が出たものについては全て 635m 以下の誤差となっている。そのため、最初から2次元として扱った方が有意に推定を行えることがわかる。さらにその推定精度に関して、一つの基準として設定した「最も信号強度が強かったセンサの位置座標と真値座標との距離（赤破線）」と比較しても約半分の推定結果がこれより誤差が小さくなった。よって、2次元での推定を基本として以降の実験を進めていく。また、以降の推定においても先ほどと同様に一定の反復回数で解が収束しなかった場合、その時点で計算を切り上げて暫定解として算出するよう設定した。実際に上記の処理をされたものは存在しなかったが、⑧-10 は解の収束までに 130 回、⑨-7 に至っては 10,000 回と他と比べて多くの反復を要した。

初期位置について

次に初期位置について考える。先ほどまでは推定計算における初期位置を「最も信号強度が強かったセンサの位置を基準とした半径 10m の円」としていた。しかしながら、この決定方法だと 5.1.1 項で考察したように、選択した固定センサ群が作る多角形の外側に初期位置が設定されてし

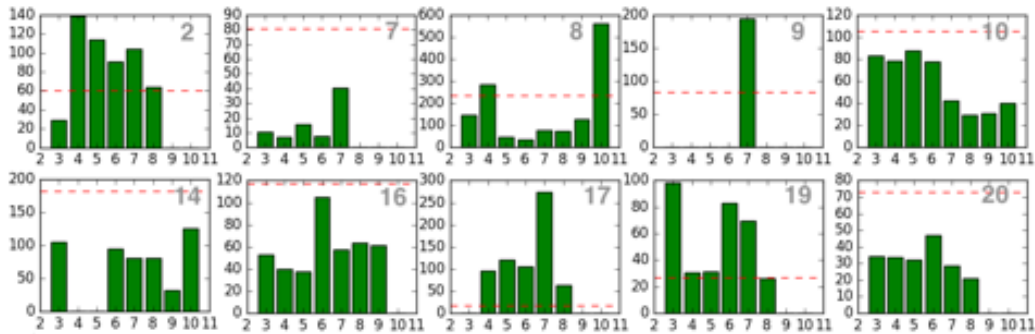


図 5.29: 初期位置を推定に使用する固定センサ群の平均位置座標とした場合の誤差

まい推定結果が悪くなってしまう可能性があると考えられる。どの固定センサの位置情報を推定に用いるかは受信時の信号強度に依存するためあらかじめ把握しておくことができず、初期位置をランダムに設定することは難しい。そこで、推定に使用する固定センサ群の平均位置座標を推定計算時の初期位置に設定することを考える。この決定方法だと初期位置は一意に定まるため、もし局所解に陥ってしまった場合は抜け出す術を持たないが、推定失敗の大部分を占める解の不算出を先ほどの決定方法より防ぐことができる。

推定時の初期位置を「推定に使用する固定センサ群の平均位置座標」とした場合の推定誤差のうち、結果が異なったものを Fig. 5.29 に示す。

20 箇所の受信場所のうち 10 箇所結果が異なった。そのうちの 8 箇所 10 パターンで新たに推定結果を得ることができただけでなく、その誤差もほとんどが同箇所他パターンと比べて小さいものであるとわかる。さらに 2 箇所 (2 と 14) について誤差が最大であったパターンが最小となるまで改善した。以上のことから、屋内実験と同様に初期位置は重要であり、使用する固定センサ群の平均位置を設定することによって大きく性能を向上させることができた。

信号強度と地形の関係について

次に使用する信号強度について考える。今回 20 箇所の受信ポイントにおいて 10 個の固定センサからデータの受信を試みた。森林環境における実験であるため、送受信経路の環境はパスごと、つまり 200 パターン存在する。本実験で受信した信号強度の回数分布を Fig.5.30 に示す。この中で -120 dB を基準とし、これより強かった地形と弱かった地形について比較し考察する。この際、ArcGis と秩父演習林の DEM データ⁷を用いて地形断面図を取得し、手持ちの RSSI データと比較した。

まず、信号強度が強かった地形の例について、Fig.5.31a は受信ポイント 4 とセンサ⑧の間の断面図 (緑部分が受信ポイントからの可視領域) であり、この時の RSSI は -89 dB であった。Fig.5.31b は受信ポイント 16 とセンサ③の間で、RSSI は -72 dB であった。どちらも端末間の距離が近くて

⁷サントリーホールディングス株式会社と東京大学が協力して行う森林整備活動の一環として取得した

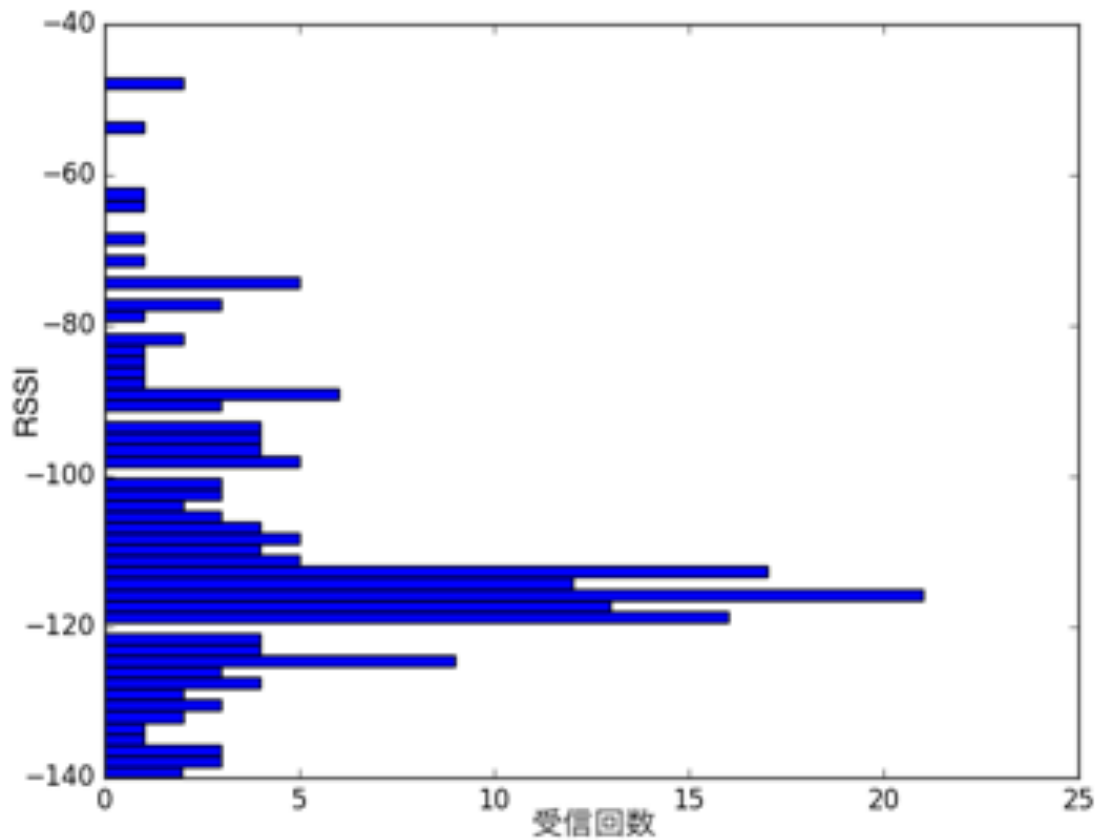
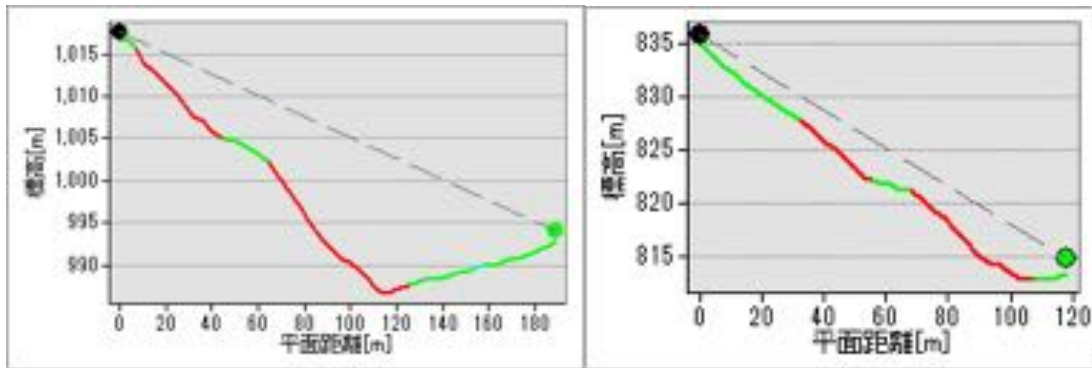


図 5.30: 各信号強度の受信回数

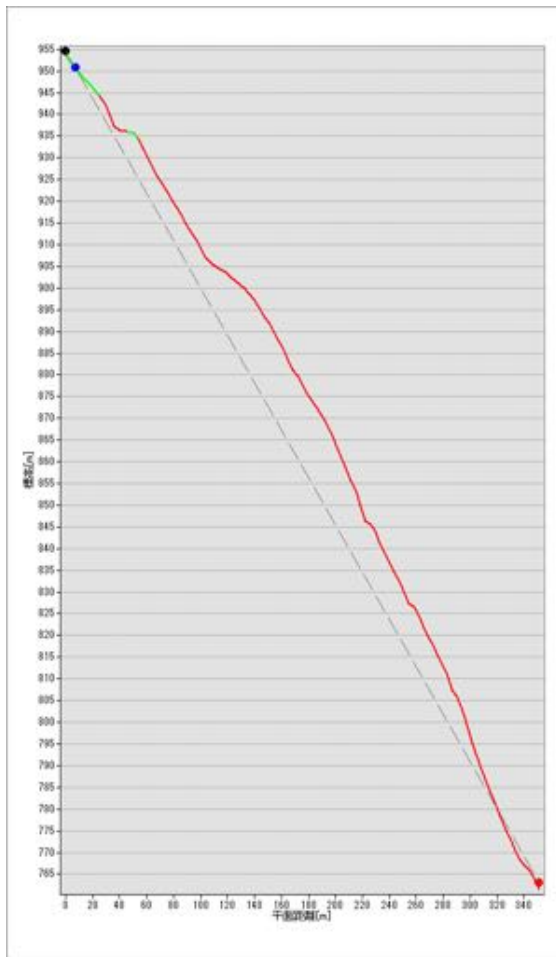
見通しもよく、信号を遮蔽するような地形ではないことがわかる。一方、信号強度が弱かった地形の例について、Fig.5.31cは受信ポイント9とセンサ①の間の断面図であり、この時のRSSIは -135 dBであった。Fig.5.31dは受信ポイント19とセンサ⑤の間で、RSSIは -132 dBであった。先ほどと比べて純粋に距離が遠いことに加えて、ポイント間の見通しも悪い。実環境ではこれに植生が加味されるので、より電波が届きにくくなっていると考えられる。

また今回の実験において、センサ⑥から発信された信号が受信できない、または他と比べて信号強度が弱いという特徴が確認できた。特に測定エリアの上部（受信ポイント1～7）と下部（16～20）においては常に -126 dBを下回っており、12箇所中10箇所で最低の信号強度（もしくは受信不可）となっていた。他のセンサからの信号は受信できていることから端末間の距離の影響は考えにくく、センサ⑥周辺の地形にも目立った点はないため、周辺の植生が原因だと考えられる。樹木の大きさによって電波の減衰も大きくなることは5.2節で検証済みであるが、樹木の種類の違いによる影響までは考察できていない。そのため、植生の違いと伝搬損失の関係把握は今後の課題としたい。

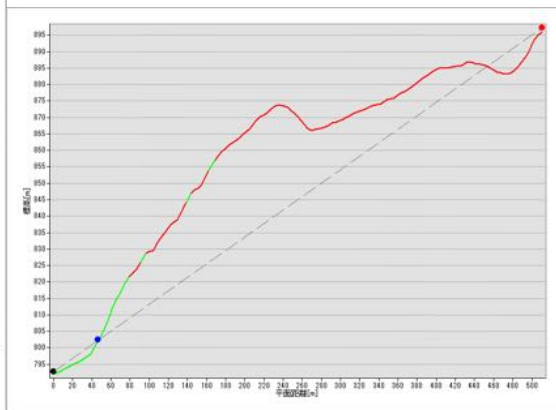


(a) 受信ポイント 4～センサ⑧ (-89dB)

(b) 受信ポイント 16～センサ③ (-72dB)



(c) 受信ポイント 9～センサ① (-135dB)



(d) 受信ポイント 19～センサ⑤ (-132dB)

図 5.31: 地形と信号強度の関係

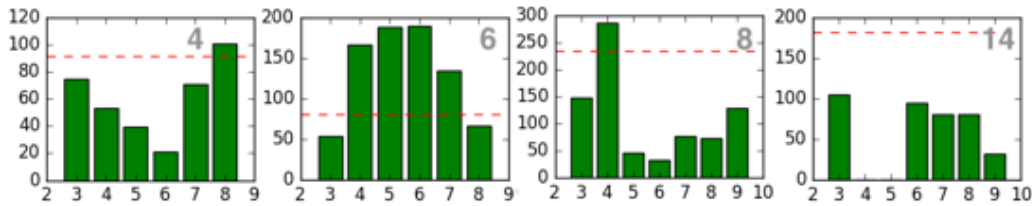


図 5.32: 閾値を-127 とした場合の誤差

信号強度の選択について

次に実際に推定に用いる信号強度の閾値について考える。5.2 節で考察した通り、端末間の障害物が信号強度に大きく影響する。5.2.2 項では、たとえ同じ距離であっても障害物が多く・大きくなればなるほど受信した際の信号強度は弱くなっていることが確認した。つまり、信号強度が弱かった場合は「端末間の距離が遠い」ことに加えて「近いけど環境が悪い」可能性も考慮しなければならない。しかしながら、位置推定はあらかじめ取得した一部の距離と信号強度の関係を利用して行うため、後者が真の原因であった場合は精度を落とすことになる。実際に、Fig.5.28-4, 5.29-8 のように、推定に使用したセンサの数が最大の時、つまり信号強度が最も弱かったものまで全て使用した時の推定結果が一番悪くなっているものも存在する。そこで、推定に使用する信号強度の閾値を設定して、精度を向上させることを考える。

5.2.2 項で確認した信号強度とパケット損失率の関係や Fig.5.30 で示した本実験における信号強度の受信回数分布から、閾値を -127 dB, -125 dB とした場合の性能の変化について考察する。

まず閾値を -127 dB とした場合に結果が変わったものを Fig.5.32 に示す。このうち性能が向上したものは 4, 8, 14 の 3 つである。特に 4 と 8 は全てのセンサを位置推定に使用した際の誤差が、センサ数が少ない時と比べて非常に大きく、最小誤差と比較すると 13~16 倍にまでなっていたが (Fig.5.28, 5.29), 閾値の設定によってそのような結果を排除し全体として性能を向上させることに成功した。一方で 6 について、センサを 9 つ使用した場合、つまり 2 番目に弱い信号強度まで使用した場合が最も精度よく推定できていたが、今回は除外されてしまった。これは、信号強度が閾値を下回った原因が障害物ではなく距離の影響であり、本来の推定精度に悪影響を及ぼしていなかったためだと考えられる。実際に、削られたのは① (Fig.5.21) のセンサ情報であり、受信ポイントから遠く離れたものであった。

次に、さらなる性能向上のために閾値を -125 dB とし、その結果を Fig.5.33 に示す。結果が変わった 2 つとも全体の性能としては向上し、特に 5 については最大誤差を除外することができた。しかしながら、推定に使えるセンサの数が大幅に減少するなど、トレードオフの関係が目立つようになってきている。そのため、本実験における閾値は -127 dB に設定することが最善であると結論づける。このときの受信ポイントごとの単純平均誤差を Table.5.9 に載せる。この表からわかるように、半数が誤差 90 m を下回った。誤差 90 m というのは、今回の実験エリアにおける短辺の $\frac{1}{5}$ 未満であり対象のおおよその位置を特定できることから、有意な結果だと言える。

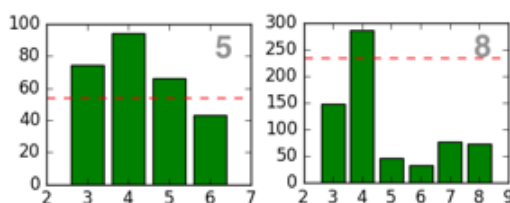


図 5.33: 閾値を-125 とした場合の誤差

表 5.9: 受信ポイントごとの単純平均誤差

position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
error_ave (m)	95.6	90.3	92.2	60.0	88.1	133.3	16.3	113.9	194.6	58.7
position	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
error_ave (m)	60.1	208.4	157.4	78.7	91.8	59.7	132.0	59.3	56.5	32.7

最終的な位置座標の決定について

ここまでそれぞれの受信ポイントにおいて、推定に使用するセンサの数ごとに互いの誤差を比較してきた。しかしながら、実際のシステム運用を想定した場合、当然真値は把握できないため誤差を算出することができない。そのため既存の情報の取捨選択で位置座標を推定して決定しなければならないのだが、これには多くの課題が存在する。例として、推定に使用するセンサの数と推定精度の間に明確な相関関係がないため、どれか1つの推定結果を採用することが困難であることが挙げられる。これは先ほど述べたように、端末間の距離だけでなく障害物も信号強度に影響することに起因するものであり、閾値を設定したとしても完全に解決するのは難しい。

そこで次に、推定した複数箇所の座標平均を求めるという手法を考えることができる。この方法によって求めた座標と真値との誤差をまとめたものを Table.5.10 に載せる。Table.5.9 と比較するとわかるように、すべての受信ポイントにおいて単純に平均誤差を求めた時よりも誤差が小さくなっており、どれか一つの結果を採用するより良い結果となる可能性が高い。

しかしながら、この方法にも問題が存在する。Fig.5.34 の2パターンを考える。どちらも推定値①～③と真値との誤差は等しいが、推定値の平均を取った場所が大きく異なる。推定値①は他の2つと比べて真値との間に大きな誤差がある。閾値の設定によって大きい誤差を排除することで全体としての性能は良くなるというのが直感的な解釈であるが、結果として Fig.5.34a のように閾値を設定しない（排除しない）場合の平均値の方がより真値に近くなる可能性もある。事実、先ほどの実験で閾値を -125 dB に設定した場合について平均誤差は小さくなったものの、座標平均の観点から見てみると性能が悪くなっていることが確認できた (Fig.5.35, 青破線が推定座標値の平均と真値との誤差)。

現在はこの手法で求めた位置座標を最終決定としているが、センサ数ごとに信頼度による重み付けをするなど他の方法を考えることもできる。この部分は今後の課題としたい。

表 5.10: 受信ポイントごとの座標平均誤差

position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
error_bary (m)	76.7	86.7	85.3	52.5	37.4	129.7	1.4	43.3	194.6	54.8
position	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
error_bary (m)	53.4	207.1	150.2	55.7	79.0	55.3	58.9	47.7	45.2	28.9

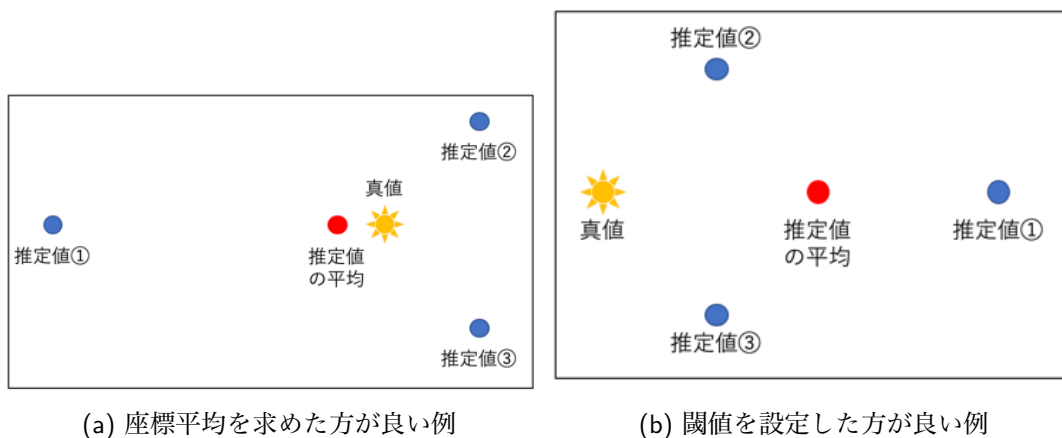


図 5.34: 座標平均か閾値か

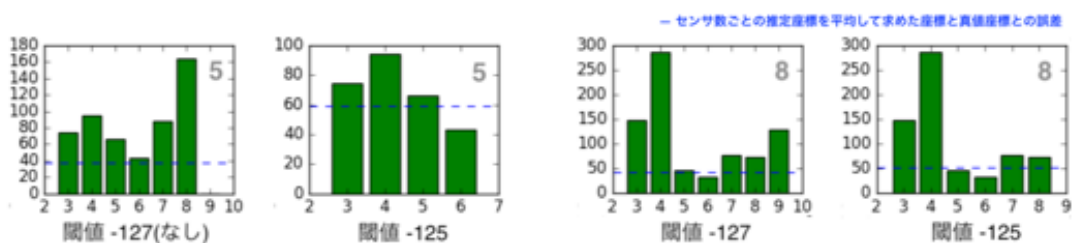


図 5.35: 閾値の設定による平均値悪化の例

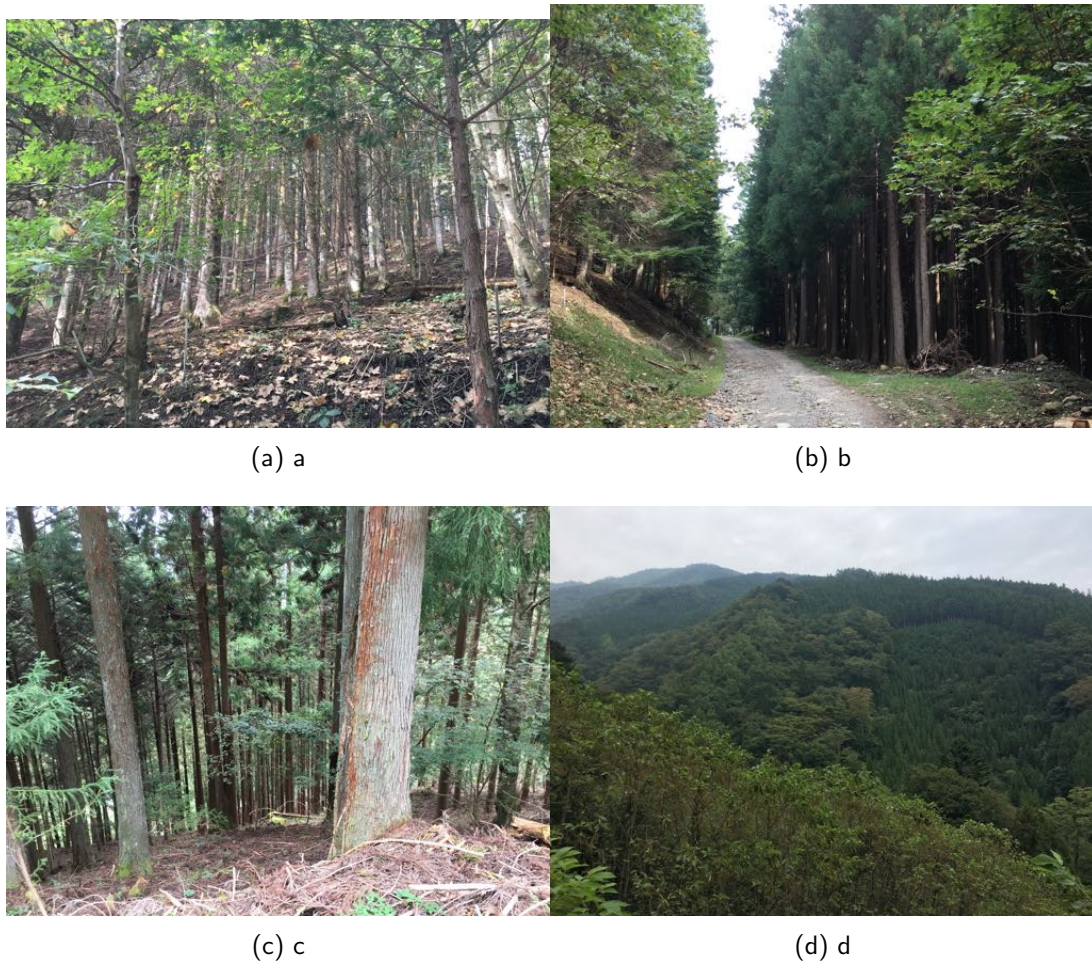


図 5.36: 実験場所の風景 (秩父演習林)

第6章 関連研究との比較議論

本章では、3章で紹介した関連研究と本研究内容、特に5.3節について比較・議論していく。

モニタリング粒度の課題

環境モニタリングについて、静的な観測ステーションのみで行おうとすると設置数が大幅に制限され、モニタリングマップの粒度が荒くなってしまうという問題点を3.1.1項で取り上げた。それに対して、都市部では人間が持つスマートフォンをセンサの代わりにするなど、観測ステーションに頼らずに非常に細かく情報を取得できるような研究が進められてきた [17, 19, 20]。

一方で、2章で取り上げたような人間の生活圏内から外れたような地域のモニタリングを考えた場合は、このような人間自身に関わる手法をとることができない。しかしながら、観測ステーションの設置にはコストのみならず安全性や環境破壊の可能性を考えなければならず、都市部以上に条件が厳しくなる。そこで、本研究では移動する動物にセンサを装着することで、観測ステーションの周辺だけでなく、そのみでは取得できない地帯の情報まで収集できるようにした。動物を利用することによって、特に鹿など群れで行動するような種を利用した場合はさらに多くの情報を取得することができ、自然環境をできるだけ改変せずに粒度細かくモニタリングすることができるようになると考えられる。

動物を使用した際のデータ送受信における課題

本研究の概念図として Fig.4.1 を載せたが、一個体（群）に任せずに、複数のエリアを繋げることも考えられる (Fig.6.1)。ここで、動物間におけるデータの送受信を考える際、中川らや牧山らが提案した動物間マルチホップシステム (3.1.2 項) では、動物同士が互いに認識できる程度の距離間を想定したものとなっていた [2, 1]。

しかしながら、実際の動物の行動を考えた場合、必ず両者が出会うとも限らない。特に、行動範囲が広く、群れ同士の接触や個体同士の接触が少ない動物であればデータの受け渡しをする機会も限られてしまう。一方、本研究では Beacon をはじめとした信号によってデータ送受信のタイミングを計っているため、信号の届く範囲であれば動物間同士でデータの受け渡しが可能となる。

しかし、Beacon をトリガーとしたデータの送受信方法について、さらに検証しなければならないこともある。今回の屋外実験ではデータの送受信中は静止状態であったが、実際の使用状況ではデータ送受信中も移動していることが考えられる。その歩行速度も動物の種や状態によって様々なので、それらを考慮した際にも正常にシステムが運用できるかを調査する必要がある。考えられる問題としては、Beacon 送信時は固定センサまたは他の動物との距離が十分に近かったが、応答が返ってくるまでに離れてしまい受信ができなくなってしまうことなどが挙げられる。このような場

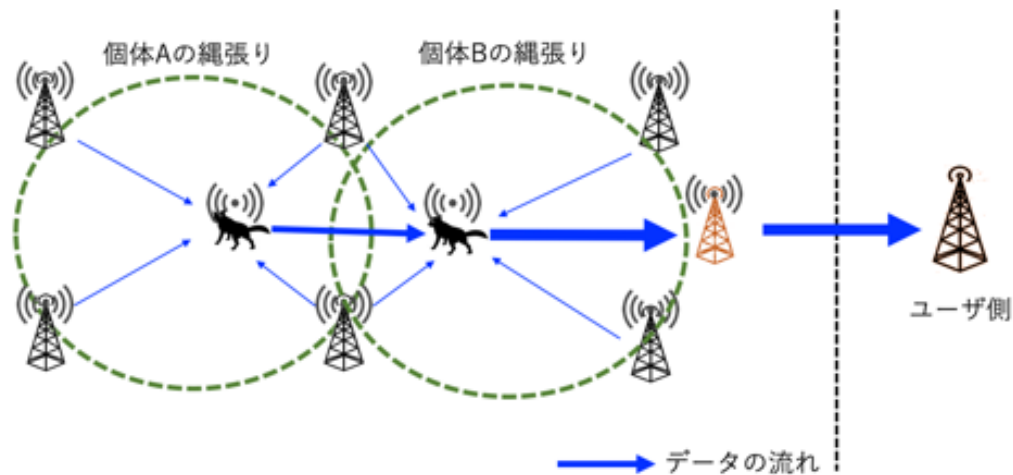


図 6.1: 複数エリアを組み合わせたシステム概念図

合、固定センサ側は動物が離れてしまったことを感知できずデータが消失してしまう。これを解決するためには、通信可能圏内に動物が存在することを信号以外の手段で確認する必要がある、例えば固定センサに熱センサなどを加えることも考えられる。送信対象の存在確認方法は今後の課題としたい。

位置推定の精度における課題

3章で紹介したように、レンジベースの位置推定にはRSSI方式の他にTDOA方式が存在する。一般的にTDOA方式の方がRSSI方式よりも精度が良いことが知られている [38, 39] が、3.2項で述べたように、TDOA方式は使用するすべての基地局で厳密に時間同期を取らなければならない。そのため、基地局、つまり固定センサが山奥などの既存のITインフラに接続できない場所に設置された場合は時刻の補正を行うことができず、今回想定しているような環境下における運用は適していない。

今回の屋外の位置推定実験において、設定した実験フィールドの大きさは $480 \times 590 (\times 273)$ mであり、このフィールドにおける最大リンク距離は635 mであった。5.2節で確認したカバレッジ性能では、障害物が多い環境においても端末間距離800 mの通信に高い確率で成功していることから、実環境にも十分に適用できる範囲だと言える。一方で、5.2.3項で確認した電波の伝搬特性の影響を受けやすいポイントや、5.3.4項で言及した植生による影響についての改善策は今後も考える必要がある。

また、梅沢ら [3] と比較した際、フィールド面積は約12倍であるのに対して平均誤差は改善された (Table.5.9)。梅沢らより性能が大幅に向上した理由として考えられるものは3つある。

まず一つに、推定次元の違いである。梅沢らは高低差を考慮するために3次元座標で位置推定を行っていたのに対し、我々は2次元 (地図平面) で推定を行った。合間らの研究 [24] でZ軸を考

慮しないという前提であったことに加え、推定において地図上での位置を決定できれば高度は一意に定まることからこの方針とした。2次元で推定を行うということは、観測方程式で扱う行列の列数を削減でき逆行列を求めるときにランク落ちしにくくなるため、そもそも計算ができないという事態を防ぎやすくなる。また、推定に最低限必要な基地局の数も減らすことができるため、推定可能なパターンを増やすことができるなど、3次元での推定に比べて多くの利点がある。しかしながら、合間らの研究では飛行機の飛行高度に対して実験エリアの高度差は無視できるものであったためZ軸の削除は妥当であり、今回の実験エリアにおいても実距離と地図距離の間に最大で20%程度の誤差しかなかったため大きな影響はなかったが、さらに大きな高低差が存在する場合にもこの前提を適用できるのかは検討する必要がある。

次に、この推定手法において非常に重要なリンク測定の正確性である。フリスの減衰公式と実環境における距離と信号強度の関係がどれだけ近似できているかを表す決定係数について、梅沢らは設置した15個の基地局全ての平均が0.49であった。一方我々は、決定係数が0.72となるようなパラメータを設定し、それを設置した10個の固定センサ（基地局）全てに適用させた。基地局ごとにパラメータを設定しても減衰公式モデルへの近似率は大きくは変わらないことを5.1節（Table.5.2）で確認済みであり、個別にパラメータを設定するよりはある一つのパラメータを正確に求める方が精度も準備時間もよくなることがわかる。

最後に、推定に使用する基地局の選択方法である。梅沢らは設置したものの中で基地局同士がなるべく遠くなるような配置になるよう選択したのに対し、今回我々は信号強度の強い順に使用する固定センサ（基地局）を選択した。強い順に選択することによって、5.1.1項で確認したような「選択した基地局が作る多角形の外側に対象が存在する」という精度が悪くなる状況が起こりうる一方で、基本的に対象から近い基地局が選択されやすくなり、より正確に減衰公式モデルを近似できている部分を利用して推定できるようになったことが推定精度向上の原因だと考えられる。

LPWAN を利用した研究における課題

3.3.1項で取り上げたLPWANの広いカバレッジという特性に関して、5.2節では、従来の携帯回線では電波が届かなかった環境下においてもLPWANを使うことでデータの送受信が可能となる例を確認できた。しかし、3.3.1項で述べたように拡散率とスループットにはトレードオフ関係があるため、大容量データの扱いには不向きである。今回の実験では気温と湿度、端末番号程度の送信情報であったが、より多くの情報、例えば各種大気質データや音声・画像ファイルなどを送信する場合でも提案システムが安定して動作するのは検証する必要がある。

第7章 おわりに

本章では本研究のまとめと今後の展望を述べる。

7.1 本研究のまとめ

本研究では、山間部など人間が容易に立ち入ることのできない地域における環境モニタリングの問題を解決するために、動物を用いた環境モニタリングシステムを提案した。本システムでは、GPSの電波を取得しにくく、従来のITインフラとも接続しにくいような環境を想定し、GPSや時刻同期を必要としない、信号強度を利用した位置推定の手法について実地実験を行い評価した。本節ではそれらの整理を行う。

最初に研究背景として自然環境のモニタリングを行うことの重要性を説き、そのモニタリングを行うための問題点や困難さについて整理した。

関連研究より、従来の参加型センシングの例として都市部における大気環境と騒音公害のモニタリングシステムの例を挙げた。続いて、それらのようなモニタリングを人間が容易に立ち入れない土地において実現するために研究されている動物間マルチホップ転送方式 [2, 1] を紹介するとともに、データと位置情報の結びつけが重要であることを提起した。それを踏まえ、GPSを用いずに行える位置推定の手法を確認するとともに、本研究で使用する LPWAN, LoRa について技術的な解説と応用研究を紹介した。

4章で、本研究で提案するモニタリングシステムの詳細を説明し、本システムの位置推定において理解しておくべき観測方程式とフリスの減衰公式について確認した。

5章では、まず屋内実験によって本手法の実現可能性を確かめた。続いて、屋外で運用するにあたって考慮すべき障害物を含めたカバレッジ調査を行い、障害物の程度の違いによるパケット損失率の比較を行うとともにパラメータ（拡散率）の影響も確認した。最後に、実際の運用環境を想定した実地実験を行い、本システムが正常に動作することと、本手法によって有意に位置推定を行うことができることがわかった。

6章では、「モニタリングの粒度・データの送受信・推定の精度」の3つの観点から関連研究と比較し、本手法によって解決できた従来手法の問題点や新たに生じた検討すべき事項を整理することができた。

7.2 今後の展望

本研究で提案した手法について有用性は確認できたが、まだ検討すべきことがいくつか残っている。今後の展望として本論文で挙げた以下の課題に取り組んでいきたい。

1. 推定する次元の適切な落とし方
2. 植生が信号に与える影響
3. 最終的な位置座標の決定方法の改善
4. データ送受信時に通信可能圏内に動物が存在することの確認

1は推定時にどのように3次元座標を2次元座標として扱うかということである。2次元として扱うことの計算上の優位性は6章で確認した。今回は単純にZ軸を無視するという方法で推定を行ったが、例えば、全てのポイントを射影した時に最もZ軸の誤差の合計が小さくなるような斜めの平面を定義するなどの方法が考えられる。2は、端末間に存在する樹木の種類によって電波の減衰幅はどれほど異なるのかということであり、3と4はそれぞれ5章の最後と6章の**データの送受信**で述べたとおりである。

謝辞

本論文は、東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻 修士課程在学中に取り組んだ研究内容をまとめたものです。

東京大学 瀬崎研究室で過ごした2年間は大変思い出深く、自分の人生において大きな糧となりました。そして、多くの方々に支えられたおかげで本研究を遂行することができ、本論文を執筆することができました。

はじめに、修士研究中に惜しめない助言や的確な指摘を数多くしてくださった瀬崎薫 教授に心から感謝を申し上げます。研究の方向性や考察に対する助言には大変助けられました。また、研究のみならず、学生として、そしてこれからの社会人生活を送る上で大切なこともたくさん学ばせていただきました。公私ともに大変お世話になりました。重ねて感謝いたします。

東京大学 空間情報科学センター 小林博樹 准教授には大変興味深くやりがいのあるテーマを提案していただきました。また、研究に関して多くの有益なアドバイスをいただいただけでなく、今後の人生を過ごす上で大切なことをお話ししていただき大変勉強になりました。おかげさまで修士2年間の研究を最後まで楽しく続けることができました。改めて深く感謝を申し上げます。

5.1 節は駒場ロッジ本館の多目的ホールをお借りして実験を行いました。複数回にわたって長時間多目的ホールをお貸ししてくださったおかげで、本研究の方向性を確かめることができただけでなく、道具を使った実験の要領を得ることができました。おかげさまで、実験において注意すべき点などを学ぶことができ、後に続く実験でも大きな困難に見舞われることなく研究を遂行することができました。ありがとうございました。

5.2 節でアリゾナに行った際、沖一雄 研究室の沖一雄 特任教授、神谷秀明 氏、並びに現地で協力してくださった宮川大輔 氏、北村裕人 氏には大変お世話になりました。慣れない土地で同行してくださっただけでなく、研究に関する助言や美味しい料理を振舞ってくださったおかげで一週間有益な実験を行うことができました。沖一雄 研究室秘書の齋藤紘子 氏には飛行機や宿の手配をはじめとした煩雑な手続きをしていただきました。おかげさまでスムーズに調査を行うことができました。心より御礼申し上げます。

5.3 節で使用した LIDAR データは、サントリーホールディングス株式会社と東京大学が協力して行う森林整備活動の一環として取得したものです。使用した LIDAR データは、サントリーホールディングス株式会社が所有しています。同実験において、東京大学 秩父演習林には大変お世話

になりました。また、東京大学 秩父演習林栃本作業所の皆様のおかげで快適に夜を越すことができ、翌日も追加実験を行うことができました。現地では槇田篤哉氏、川瀬純也氏、下徳大祐氏に協力していただいたおかげで満足いく実験を行うことができました。実験やデータ使用のための事務手続きのみならず、私の準備不足を見越して必要そうな備品を前もって用意していただいたり、私自身よりも長期間現地に滞在して準備していただいたり、実地実験に不慣れな私を最大限サポートしていただきました。帰ってきてからも有益なアドバイスを多数いただいただけでなく、データの扱い方などもサポートしていただいたおかげで、無事考察を行うことができました。ご協力賜りました皆様に感謝の意を表します。

東京大学 生産技術研究所 西山勇毅 助教には研究や発表に関して多くの有益な助言をいただいただけでなく、普段の研究室生活においても大変手厚く気にかけていただきました。本論文執筆中もそれ以前も、研究室に行くたびに声をかけてくださったことが大変嬉しかったです。このようなコミュニケーションのおかげで、研究室に来てただ1人で作業して帰るだけ、というような寂しさを覚えることもなく、常に健康な精神状態で研究を進めることができました。厚くお礼申しあげます。

東京大学 瀬崎研究室 OB の北里知也氏、伊藤匡一氏、梅沢啓佑氏には研究のみならず、就活に関して相談にのっていただきました。あの時いただいたアドバイスのおかげで将来に対する不安が減り、自分が納得できる進路を選ぶことができました。

先輩として研究への取り組み方をその身をもって示してくださった Sun Yao 氏、Tiantian Jiang 氏、Ben RUKUTANTICHOKE 氏、楊珂為氏、中村裕一氏、互いに励まし切磋琢磨しあってきた同期の Song Chenwei 氏、Zhang Ruichao 氏、日頃から大変親しく接してくれた後輩の小田紘介氏、小野翔多氏、神村潤氏、小池優太郎氏、日隈壮一郎氏、Meiyi Chen 氏、牛島秀暢氏、Nguyen Hong Duc 氏、Helingyi Peng 氏、Zenyi Han 氏のおかげで、普段の研究室生活やイベント関連を楽しく充実して過ごすことができました。また、秘書の松本夏穂氏、内藤潤氏に事務手続きや学会参加のサポートをしていただいたおかげで研究活動を快適に進めることができました。

ここに挙げた方々以外にも多くの方に支えられて、この論文を完成させることができました。

最後に、本日までの非常に長い学生生活を様々な面から支えてくれた家族に深く感謝し、この論文の結びとさせていただきます。

参考文献

- [1] K. Makiyama, K. Nakagawa, M. Katayama, M. Nagasawa, K. Sezaki, and H. Kobayashi, “Synchronization of peripheral vision and wearable sensors for animal-to-animal interaction,” *International Conference on Human-Computer Interaction*, pp.753–764, Springer, 2015.
- [2] K. Nakagawa, H. Kobayashi, and 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*, p.27, ACM, 2014.
- [3] 梅沢啓佑, 瀬崎薫, and 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),” *電子情報通信学会技術研究報告= IEICE technical report: 信学技報*, vol.117, no.464, pp.135–140, 2018.
- [4] L. Li, J. Ren, and Q. Zhu, “On the application of lora lpwan technology in sailing monitoring system,” *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pp.77–80, IEEE, 2017.
- [5] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, “On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology,” *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pp.55–59, IEEE, 2015.
- [6] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Hämäläinen, and J. Iinatti, “Evaluation of lora lpwan technology for remote health and wellbeing monitoring,” *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, pp.1–5, IEEE, 2016.
- [7] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, R. Yasmin, M. Hämäläinen, and J. Iinatti, “Evaluation of lora lpwan technology for indoor remote health and wellbeing monitoring,” *International Journal of Wireless Information Networks*, vol.24, no.2, pp.153–165, 2017.
- [8] I. Peña-López *et al.*, “Itu internet report 2005: the internet of things,” 2005.
- [9] H.S. Dhillon, H. Huang, and H. Viswanathan, “Wide-area wireless communication challenges for the internet of things,” *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.2, pp.168–174, 2017.
- [10] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low power wide area networks: An overview,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no.2, pp.855–873, 2017.

- [11] 伊藤昌毅, 中川慶次郎, 小林博樹, 瀬崎薫, *et al.*, “動物を利用した環境調査のための遭遇検知による効率的なデータ転送手法の提案,” 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, vol.2014, pp.605–612, 2014.
- [12] 中川慶次郎, 小林博樹, 奥野淳也, 岩井将行, 瀬崎薫, *et al.*, “O-009 フィールド調査負荷を考慮した動物の生態行動を逆利用したデータ運搬手法の提案 (o 分野: 情報システム, 一般論文),” 情報科学技術フォーラム講演論文集, vol.12, no.4, pp.527–530, 2013.
- [13] 村松佳奈, 小林博樹, 奥野淳也, 藤原章雄, 中村和彦, and 斎藤馨, “リモートしかじゃらし: 携帯情報端末を通じた森林仮想体験環境の構築,” 情報処理学会シンポジウムシリーズインタラクシオン 2015 論文集, pp.216–218, 2015.
- [14] D. Mage, G. Ozolins, P. Peterson, A. Webster, R. Orthofer, V. Vandeweerd, and M. Gwynne, “Urban air pollution in megacities of the world,” *Atmospheric Environment*, vol.30, no.5, pp.681–686, 1996.
- [15] A. Carullo, S. Corbellini, and S. Grassini, “A remotely controlled calibrator for chemical pollutant measuring-units,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.56, no.4, pp.1212–1218, 2007.
- [16] N. Yamazoe and N. Miura, “Development of gas sensors for environmental protection,” *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, vol.18, no.2, pp.252–256, 1995.
- [17] D. Hasenfratz, O. Saukh, S. Sturzenegger, and L. Thiele, “Participatory air pollution monitoring using smartphones,” *Mobile Sensing*, vol.1, pp.1–5, 2012.
- [18] E. Commission, “Green paper on future noise policy,” 1996.
- [19] N. Maisonneuve, M. Stevens, M.E. Niessen, and L. Steels, “Noisetube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones,” in *Information technologies in environmental engineering*, pp.215–228, Springer, 2009.
- [20] N. Maisonneuve, M. Stevens, M.E. Niessen, P. Hanappe, and L. Steels, “Citizen noise pollution monitoring,” *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Digital Government Research: Social Networks: Making Connections between Citizens, Data and Government*, pp.96–103, Digital Government Society of North America, 2009.
- [21] H. Kobayashi, H. Kudo, and Y. Sasaki, “Radioactive live soundscape,” *SIGGRAPH Asia 2018 Art Gallery*, p.11, ACM, 2018.
- [22] K. Murao and T. Terada, “A recognition method for combined activities with accelerometers,” *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, pp.787–796, ACM, 2014.

- [23] K. Ho and Y. Chan, “Solution and performance analysis of geolocation by tdoa,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.29, no.4, pp.1311–1322, 1993.
- [24] Y. Kamma, K. Sezaki, and H. Kobayashi, “Poster: spatio-temporal information correction mechanism for wild animal wearable sensors,” *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services Companion*, pp.40–40, 2016.
- [25] S. Yiu, M. Dashti, H. Claussen, and F. Perez-Cruz, “Wireless rssi fingerprinting localization,” *Signal Processing*, vol.131, pp.235–244, 2017.
- [26] J.A. Shaw, “Radiometry and the friis transmission equation,” *American journal of physics*, vol.81, no.1, pp.33–37, 2013.
- [27] L.A.T. Committee, “Lorawan 1.1 regional parameters,” ,” *Standard V1*, vol.1, 2017.
- [28] K. Zheng, S. Zhao, Z. Yang, X. Xiong, and W. Xiang, “Design and implementation of lpwa-based air quality monitoring system,” *IEEE Access*, vol.4, pp.3238–3245, 2016.
- [29] A. Simo, C. Barbulescu, S. Kilyeni, and C. Dragos, “Lora based energy efficiency improving in manufacturing processes,” *2018 7th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)*, pp.156–161, IEEE, 2018.
- [30] X.h. XIE, Y.f. LV, Z.y. MU, P.x. BIAN, J. Jie, L.m. XU, and W. Neng, “An intelligent smoke detector system based on lora and indoor positioning,” *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, no.CCNT, 2018.
- [31] NTTdocomo, “沖縄県における「lora」を活用したマリンセーフティ実証実験の実施。” https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_181022_01.pdf.
- [32] NTTdocomo, “林業従事者の安否確認・事故検知に関する実証実験を開始。” https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_180620_00.pdf.
- [33] G. Blewitt, “Basics of the gps technique: observation equations,” *Geodetic applications of GPS*, pp.10–54, 1997.
- [34] 総務省, “情報通信審議会 情報通信技術分科会 ip ネットワーク設備委員会 技術検討作業班 報告書 (案).” https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/ipnet/pdf/061121_2_9-2.pdf.
- [35] KDDI, “Kddi インターネットゲートウェイ: サービス品質保証 (sla).” <https://www.kddi.com/business/network/internet/internet-gateway/sla/>.
- [36] 総務省, “情報通信審議会 情報通信技術分科会陸上無線通信委員会 報告書 (案).” https://www.soumu.go.jp/main_content/000455648.pdf.
- [37] 福島荘之介, “研究・開発の動向事情 理解するための gps 測位計算プログラム入門 (1)wgs-84 と座標変換のはなし,” *航空無線*, no.34, pp.67–73, 2002.

- [38] C. Perkins, L. Lei, M. Kuhlman, T.H. Lee, G. Gateau, S. Bergbreiter, and P. Abshire, “Distance sensing for mini-robots: Rssi vs. tdoa,” 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS), pp.1984–1987, IEEE, 2011.
- [39] M. Laaraiedh, L. Yu, S. Avrillon, and B. Uguen, “Comparison of hybrid localization schemes using rssi, toa, and tdoa,” 17th European Wireless 2011-Sustainable Wireless Technologies, pp.1–5, VDE, 2011.

発表文献

石田幸輝, 瀬崎薫, 小林博樹, “動物間ネットワークのための LPWAN を用いた位置推定”, Proceedings of the 2019 IEICE Society Conference, 2019