

修士論文

建造物付近における RSSI Kriging
補間値の特性

令和三年度

三重大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

宮本 椋生

目次

図目次	3
第 1 章 はじめに	5
1.1. 研究目的	5
1.2. 本論文の構成	7
第 2 章 電波環境マップ構築と Kriging 補間	8
2.1. 電波環境マップ構築の概要	8
2.2. 電波環境マップ構築における補間推定のための変数定義	9
2.3. Kriging 補間	10
2.4. 電波環境マップ構築における Kriging 補間の適用	11
2.5. セミバリオグラム	14
2.5.1. セミバリオグラムの概要	14
2.5.2. 各理論的セミバリオグラムモデルの定義式と図	16
2.5.3. セミバリオグラム関数の決定手順	17
2.6. 補間手順のまとめ	20
第 3 章 建造物付近での電波環境マップ	22
3.1. 建造物付近での電波環境マップ	22
第 4 章 測定系概要	23
4.1. LoRa モジュール概要	23
4.2. 送信機概要	24
4.3. 受信機概要	25
第 5 章 実証実験	27
5.1. 三重大学構内での測定および観測・評価エリアの定義	27
5.2. 実験結果	30
5.3. 図書館裏エリアの各領域における RMSE の分布	32
第 6 章 おわりに	36
6.1. まとめ	36
6.2. 今後の課題	37
参考文献	38
研究業績	40
謝辞	41

付録 RSSI 観測値の図示方法..... 42

目次

図 1.1 無線センサネットワーク	6
図 1.2 本論文の構成	7
図 2.1 欠損情報も含まれた電波環境マップのモデル図	9
図 2.2 各セミバリオグラムモデルの図	17
図 2.3 セミバリオグラム雲	18
図 2.4 距離方向に平均化した経験的セミバリオグラム	19
図 2.5 平均化された経験的セミバリオグラムを理論的セミバリオグラムで フィッティングしたもの	20
図 3.1 建造物付近での RSSI 値の実観測値と推定値の比較	22
図 4.1 LoRa モジュール	23
図 4.2 送信局の外観	24
図 4.3 受信局の外観	25
図 4.4 受信機系を運びやすくしたもの	26
図 5.2 実観測により得られた電波環境マップ	28
図 5.3 観測エリアの定義 (1)	29
図 5.4 観測エリアの定義 (2)	30
図 5.5 評価エリアの定義	31
図 5.8 領域 A を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布	33
図 5.9 領域 B を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布	33
図 5.10 領域 C を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布	34
図 5.11 領域 C ₁ を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布	34
図 5.12 領域 C ₂ を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布	35

図 5.13 領域 C_3 を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布.... 35

第1章 はじめに

1.1. 研究目的

インターネットは本来コンピュータ同士を接続するためのものであったが、近年、IoT(Internet of Things)が注目されており、様々なモノをインターネットに接続するということが考えられている。IoTによりモノを操作する遠隔制御、モノの状態を知る遠隔監視、モノ同士でのデータ送受信などの実現が可能である。例えば、IoTでモノを操作する例としてエアコン・照明の制御、モノの状態を知る例として環境(温度, 湿度, 気圧, 照度, 騒音等)を知る環境モニタリング, モノ同士でのデータ送受信の例としてスマートホームなどがある [1]。一方, IoT技術の発展により膨大な数のデータ通信が行われるため, 膨大な数のIoT端末を安価にネットワークに接続すること, 低消費電力であること, 膨大な数のIoT端末と接続ができる通信手段である技術が求められている [2]。このような要件に特化しているのが920MHz帯のLPWA (Low Power Wide Area) 通信である。LPWA通信の通信速度は数kbpsから数百kbps程度と携帯電話システムと比較して低速なものの, 一般的な電池で数年から数十年にわたって運用可能な省電力性や, 数kmから数十kmもの通信が可能な広帯域性を有している [3]。このようなことから920MHz帯のLPWA通信はIoT社会の実現に不可欠な無線センサネットワーク用に期待されている。無線センサネットワークとは, 多数の無線センサを配置し, 無線通信で相互に接続したネットワークのことである(図1.1)。無線センサの設置には, 電波環境マップ(REM: Radio Environment Map)を利用して決定される。電波環境マップは一般的に位置ごとの平均受信電力-RSSI (Received Signal Strength Indicator) 値を格納したマップと定義される [4]。電波環境マップはあらかじめ実観測値に基づいて構築され, 原則, 全通信エリアでの

平均 RSSI 値が必要である。しかし、現実的には全通信エリア、特に人間が通行しにくい場所などの測定困難な場所での測定は難しい。さらに、センサの設置は測定困難な場所に配置されることが多い。このような測定困難なエリアでの RSSI 値は推定することで得られる。RSSI 値は主に距離減衰成分とシャドウイング成分の二つからなる。RSSI 値の推定方法には、経験則に基づく電波伝搬モデル、実データセットの関数への当てはめなどがあるが、この方法ではシャドウイング成分を推定できない。一方、Kriging 補間を用いることでシャドウイング成分を精度良く推定できることが知られていることから、RSSI 値は Kriging 補間を用いると精度良く推定できると言われている [5, 6, 7, 8]。Kriging 補間は距離のみに依存する補間方法であり、建造物付近での Kriging 補間による推定値の精度は検証されていない。本研究ではまず、建造物付近での RSSI 値を実観測により求める。次に、建造物周辺道路での RSSI 値を実観測により求め、Kriging 補間により建造物付近における RSSI 値の推定値を算出する。建造物付近の実観測値と Kriging 推定値を比較し、建造物付近の Kriging 補間の精度を明らかにする。

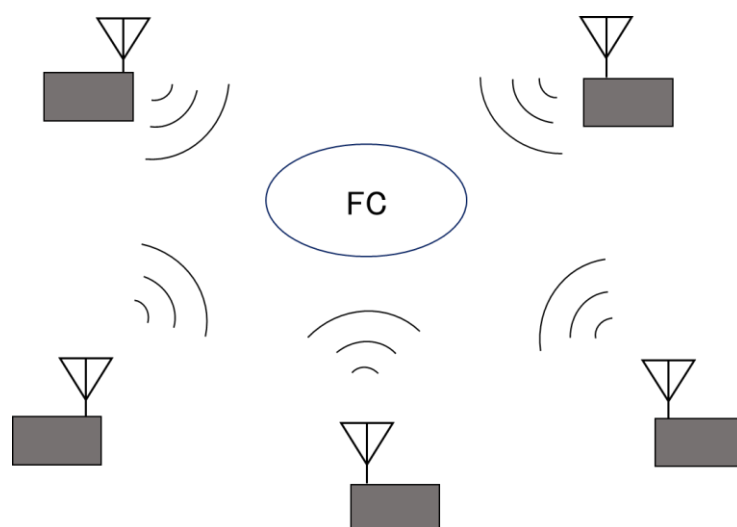


図 1.1 無線センサネットワーク

1.2. 本論文の構成

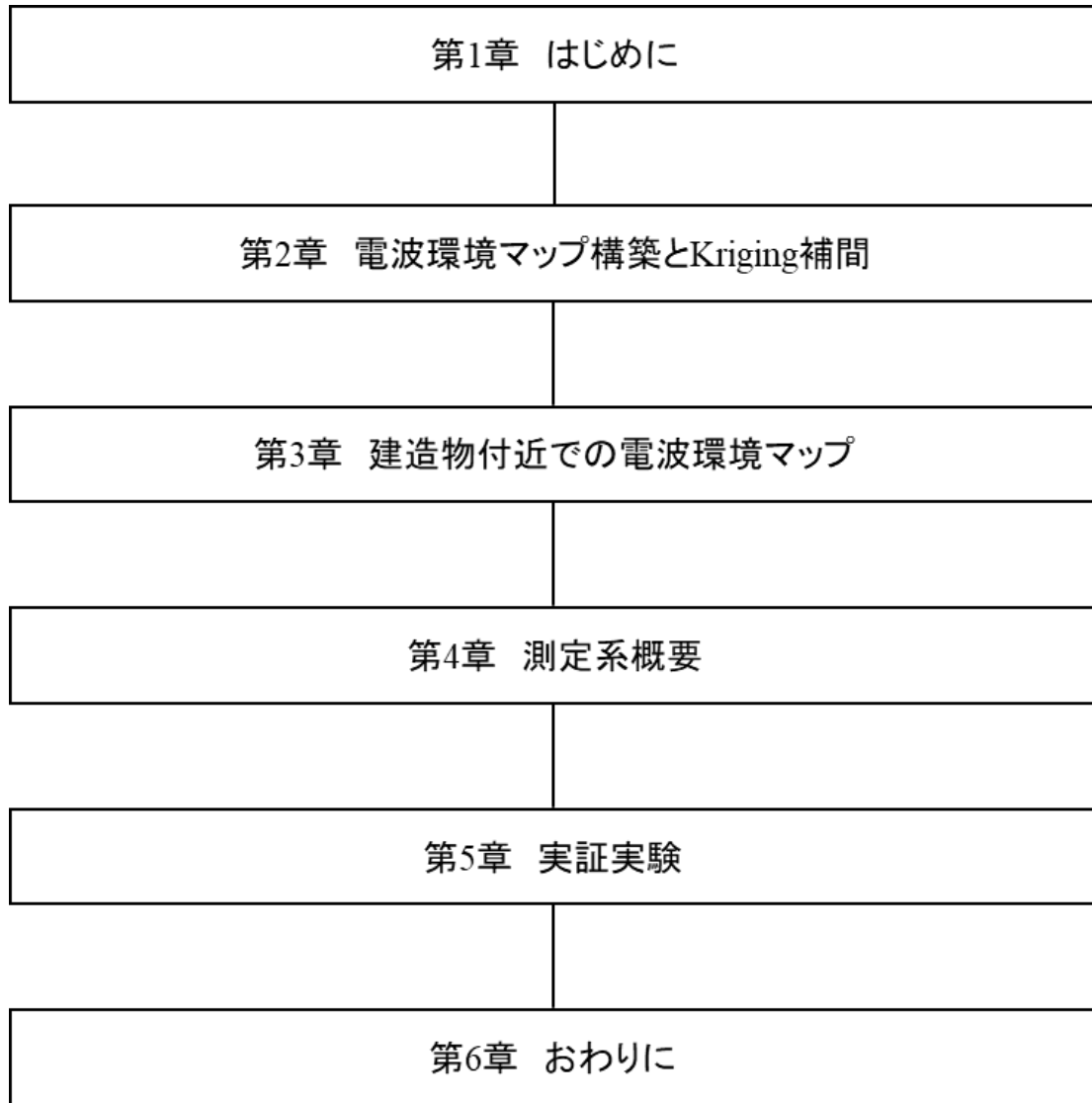


図 1.2 本論文の構成

本論文の構成を図 1.2 に示す。第 2 章で参考文献 [4]に基づいた電波環境マップの構築方法、Kriging 補間、セミバリオグラムの説明を述べている。第 4 章では本研究で用いる測定系について説明をしている。また、第 5 章では三重大学構内での測定結果に基づき、補間誤差の実験結果を述べている。第 6 章では、本論文のまとめを示している。

第2章 電波環境マップ構築と Kriging 補間

電波環境マップは位置ごとの平均受信電力値を二次元で地図上に示したマップのことである。電波環境マップは空き帯域予測、干渉管理など様々な分野の適用が検討されており、周波数利用効率を改善する現実的なツールとして扱われている。この章では電波環境マップ構築の概要について述べる [4]。

2.1. 電波環境マップ構築の概要

電波環境マップを構築するためには、観測位置と観測位置における受信信号電力が必要である。観測位置は GPS 機能を用いるまたはメジャーによって定める。受信電力値はスマートフォン、スペクトラムアナライザ、Raspberry Pi などの端末で実観測する。この際、観測した受信電力値にはマルチパスフェージングによる瞬時変動成分が含まれてしまう。マルチパスフェージングとは送信された電波は空間を伝搬する際に、反射などにより複数の伝搬路を通り受信側に到達ことでそれらの信号が干渉しあうことである。瞬時変動成分を除去するために数 m -百 m × 数 m -百 m 程度のメッシュに切って各エリアにおいて十分な回数の観測情報を得、観測情報を平均化する。この際、受信電力が観測できないエリア（あまり人間が通行しないエリア、建造物付近、危険エリアなど）があることから、得られる情報は図 2.1 に示したマップのようになることから欠損情報が存在してしまう。これらの欠損情報は補間推定した値を用いる。この補間推定は Kriging 補間を用いると精度良く補間推定されると言われている。

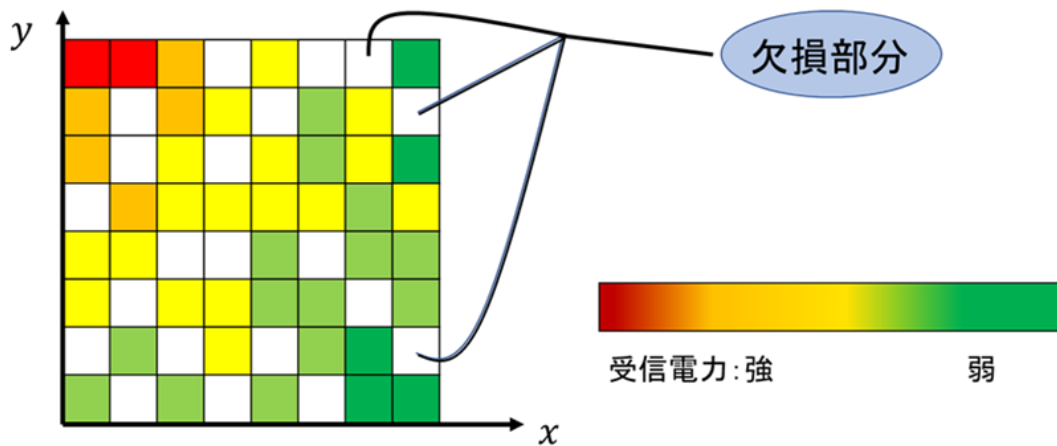


図 2.1 欠損情報も含まれた電波環境マップのモデル図

2.2. 電波環境マップ構築における補間推定のための変数定義

この節では、本稿で用いる変数定義について述べる。電波環境マップ構築のための座標設定は 2 次元平面上に存在すると考える。また、送信局の位置座標は固定するものとする。よって、各変数を次のように定義する。

$$\mathbf{x}_i = [x_{i1} \quad x_{i2}]^T \quad (2.1)$$

$$\mathbf{x}_{Tx} = [x_{Tx1} \quad x_{Tx2}]^T \quad (2.2)$$

$$\mathbf{y} = [P(\mathbf{x}_1) \quad P(\mathbf{x}_2) \quad \cdots \quad P(\mathbf{x}_i) \quad \cdots \quad P(\mathbf{x}_N)]^T \quad (2.3)$$

ここで、 \mathbf{x}_i は 2 次元観測位置ベクトル、 \mathbf{x}_{Tx} は送信局の 2 次元位置座標ベクトル、 N は観測地点の個数、 \mathbf{y} は観測データセットベクトル、 $P(\mathbf{x}_i)$ は地点 \mathbf{x}_i における受信電力値を表し、 $(\cdot)^T$ は転置行列を表わす。ただし、 $P(\mathbf{x}_1), P(\mathbf{x}_2), \cdots,$

$P(\mathbf{x}_N)$ での受信電力はマルチパスフェージングによる瞬時変動成分を観測情報の平均を取ることによって取り除いた値であり，単位は[dBm]を用いるものとする．また， $P(\mathbf{x})$ は次式でモデル化されるものとする．

$$P(\mathbf{x}) = P_C - 10\eta \log_{10}\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{Tx}\| + W(\mathbf{x}) \quad (2.4)$$

ここで， P_C [dBm]は送信電力を表す．また， η は距離減衰係数を表す．また， $W(\mathbf{x})$ [dB]はシャドウイング成分を表す．

シャドウイング成分は，空間相関を有することが知られている．データ内に空間的な相関を持つ距離または方向のバイアスがある場合，Kriging 補間が最適であると空間統計学で議論されている．このことから Kriging 補間は無線通信の分野においても適用効果があると言われている．Kriging 補間には，データの空間自己相関のみを考慮する常 Kriging(OK : Ordinary Kriging)と線形回帰モデルの誤差の共分散を共分散関数でモデル化する普遍 Kriging(UK : Universal Kriging)などが存在する．今回の補間では常 Kriging について述べる．

2.3. Kriging 補間

Kriging 補間は周囲の観測値を位置情報により重みづけをすることで，補間推定する手法である．したがって，Kriging 補間による補間推定の式は次式で表せる．

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N w_i Z(x_i) \quad (2.5)$$

ただし, $\hat{Z}(\mathbf{x}_0)$ は $Z(\mathbf{x}_0)$ の推定値, $Z(\mathbf{x}_i)$ は i 番目の位置における計測値, \mathbf{x}_0 は推定したい地点, N は計測値の総数, w_i は i 番目の位置における重み係数を表す. ここで用いる N はメッシュに切って平均化された数のことである. 重み係数 w_i は推定値の不偏性を制約条件にし, 誤差の分散を最小とすることで最適化をされる.

2.4. 電波環境マップ構築における Kriging 補間の適用

式(2.5)を式(2.4)に示した電波伝搬モデルで当てはめると, 式(2.5)の $Z(\cdot)$ は式(2.4)のシャドウイング成分 $W(\mathbf{x})$ に対応する. しかし, 式(2.4)にはトレンドが存在する成分があるため, 最小二乗法(OLS: Ordinary Least Squares)によって定数項 P_C , 距離減衰係数 η の推定値 \hat{P}_C , $\hat{\eta}$ を算出する. したがって, トレンド除去された $W(\mathbf{x})$ を $\hat{W}(\mathbf{x})$ として次式で表せられる.

$$\hat{W}(\mathbf{x}_i) = P(\mathbf{x}_i) - (\hat{P}_C - 10\hat{\eta} \log_{10} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{T_x}\|) \quad (2.6)$$

ただし, $P(\mathbf{x}_i)$ は, \hat{P}_C および $\hat{\eta}$ は, 最小二乗法によって推定された P_C , η であり, \mathbf{x}_i は周囲の 2 次元位置座標ベクトル, \mathbf{x}_{T_x} は送信局の 2 次元位置座標ベクトルである. したがって, 式(2.4)の電波伝搬モデルにおいて $P(\mathbf{x})$ を $\hat{P}(\mathbf{x}_0)$, P_C を \hat{P}_C , η を $\hat{\eta}$, $W(\mathbf{x})$ を $\hat{W}(\mathbf{x})$, \mathbf{x} を \mathbf{x}_0 に置き換えると次のような補間推定の式が得られる.

$$\hat{P}(\mathbf{x}_0) = \hat{P}_C - 10\hat{\eta} \log_{10} \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{T_x}\| + \hat{W}(\mathbf{x}_0) \quad (2.7)$$

また, 式(2.5)において, $\hat{Z}(\mathbf{x}_0)$ を $\hat{W}(\mathbf{x}_0)$, $Z(\mathbf{x}_i)$ を $\hat{W}(\mathbf{x}_i)$ に置き換えて Kriging 補間の式は次式に置き換わる.

$$\hat{W}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^N w_i \hat{W}(\mathbf{x}_i) \quad (2.8)$$

式(2.8)を式(2.7)に代入すると

$$\hat{P}(\mathbf{x}_0) = \hat{P}_c - 10\hat{\eta} \log_{10} \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{Tx}\| + \sum_{i=1}^N w_i \hat{W}(\mathbf{x}_i) \quad (2.9)$$

が得られる. 式(2.6)を式(2.9)に代入すると最終的な補間推定の式として,

$$\begin{aligned} \hat{P}(\mathbf{x}_0) = & \hat{P}_c - 10\hat{\eta} \log_{10} \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{Tx}\| \\ & + \sum_{i=1}^N w_i \left(P(\mathbf{x}_i) - (\hat{P}_c - 10\hat{\eta} \log_{10} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{Tx}\|) \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

が得られる. 最後に, 重み係数 w_i を求める. Kriging 補間では推定値の不偏性を制約条件にするので, 次式が得られる.

$$E[W(\mathbf{x}_0) - \hat{W}(\mathbf{x}_0)] = 0 \quad (2.11)$$

また, この制約条件もとにして, 誤差の分散値 σ_k^2 を最小化することを目的として重み係数 w_i を最適化する.

$$\sigma_k^2 = \text{Var}[W(\mathbf{x}_0) - \widehat{W}(\mathbf{x}_0)] \quad (2.12)$$

式(2.11)の不偏性に関する制約は次式のように変形できる.

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (2.13)$$

よって, 式(2.13)のもとで式(2.12)を最小化したいのでラグランジュの未定乗数法により, 式(2.12)と式(2.13)とラグランジュの未定乗数 μ を用いると, 目的関数は

$$\phi(w_i, \mu) = \sigma_k^2 - 2\mu \left(\sum_{i=1}^N w_i - 1 \right) \quad (2.14)$$

で表すことができる. また, σ_k^2 はセミバリオグラムを用いて次式のように表すことができる [9].

$$\sigma_k^2 = -\gamma(d_{0,0}) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i w_j \gamma(d_{i,j}) + 2 \sum_{i=1}^N w_i \gamma(d_{i,0}) \quad (2.15)$$

ただし, $d_{i,j} \triangleq \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$ であり, セミバリオグラムは

$$2\gamma(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) = \text{Var}[W(\mathbf{x}_i) - W(\mathbf{x}_j)] \quad (2.16)$$

を満たす。(セミバリオグラムについては2.5. で述べる。) 目的関数を各重み係数で偏微分し、それぞれをイコールゼロと置くことで $N + 1$ 元連立方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \gamma(d_{1,1}) & \cdots & \gamma(d_{1,N}) & 1 \\ \gamma(d_{2,1}) & \cdots & \gamma(d_{2,N}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(d_{N,1}) & \cdots & \gamma(d_{N,N}) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(d_{1,0}) \\ \gamma(d_{2,0}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{N,0}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

これを解くと、各重み係数 $w_1 \sim w_N$ が求められるので、式(2.10)に各重み係数を代入すると地点 x_0 における受信電力の補間値を求めることができる。

2.5. セミバリオグラム

2.5.1. セミバリオグラムの概要

2 地点の距離のみに依存して相関を考えたものバリオグラムと言い $2\gamma(d)$ で表す。このバリオグラムを半分の値にしたものをセミバリオグラムと呼び $\gamma(d)$ で表される。理論的なモデルのセミバリオグラムを理論的セミバリオグラム、観測値を元に得られたセミバリオグラムを経験的セミバリオグラムという。理論的セミバリオグラムには、指数モデル (exponential-model)、ガウスモデル (gaussian-model)、べき乗モデル (power-model)、線形モデル (linear-model)、ナゲット効果モデル (nugget-effect) などのモデルが存在する。このモデルの選択は補間対象によって使い分けが必要である。経験的セミバリオグラムは縦軸

に $(\widehat{W}(\mathbf{x}_l) - \widehat{W}(\mathbf{x}_m))^2$, 横軸に 2 点間の距離 d を取って全てのペアをプロットすることによって得られる (ただし, $\mathbf{x}_l \neq \mathbf{x}_m$) . セミバリオグラム関数 $\gamma(d)$ には (最大) 三つのパラメータ, ナゲット (nugget) , シル (sill) , レンジ (range) がある. 三つのパラメータの変数, 意味を表 2.2 に示す.

表 2.2 セミバリオグラムの各パラメータの説明

	変数	意味
ナゲット	α_n^2	$\gamma(d)$ の $d = 0$ のときの値
シル	α_s^2	$\gamma(d)$ の $d = \alpha_r$ のときの値
レンジ	α_r	自己相関がなくなる距離

セミバリオグラム関数の決定は, あらかじめ理論的セミバリオグラムモデルを選択した後, 経験的セミバリオグラムを理論的セミバリオグラムに非線形最小二乗法によりフィッティングすることによって, α_n^2 , α_s^2 , α_r のセミバリオグラムの三つのパラメータを求めればよい. セミバリオグラムを求める際のルールとして, プロットする点数が 30 以上でなければならないこと, $\gamma(d)$ の値に信頼を持てるのは D を 2 点の最大距離とすると $d < D/2$ の範囲だけであることが知られている [10]. 2.5.2. で理論的セミバリオグラムのいくつかのモデルについて述べる.

2.5.2. 各理論的セミバリオグラムモデルの定義式と図

この節では代表的な理論的セミバリオグラムモデルである指数モデル，ガウスモデル，べき乗モデル，線形モデル，ナゲットモデルの定義式を示し，それぞれの図も併せて示す．

指数モデルの式は次式で与えられる．

$$\gamma_{EXP}(d) = \alpha_n^2 + \alpha_s^2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{d}{\alpha_r}\right) \right\}$$

補間対象が指数変動するとき，指数モデルを用いると良い．また，ガウスモデルは次式で与えられる．

$$\gamma_{GA}(d) = \alpha_n^2 + \alpha_s^2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{d}{\alpha_r}\right)^2 \right\}$$

補間対象がガウス変動するとき，ガウスモデルを用いると良い．また，べき乗モデルの式は次式で与えられる．

$$\gamma_{POW}(d) = \alpha_n^2 + \alpha_s^2 d^{\alpha_r}$$

補間対象がべき乗的に変動するとき，べき乗モデルを用いると良い．また，線形モデルの式は次式で与えられる．

$$\gamma_{LI}(d) = \alpha_n^2 + \alpha_s^2 d$$

補間対象が線形的に変動するとき，線形モデルを用いると良い．ナゲットモデルは，レンジのパラメータが存在しない点に注意すべきである．また，ナゲットモデルの式は次式で与えられる．

$$\gamma_N(d) = \alpha_n^2$$

ナゲットモデルは，シル，レンジのパラメータが存在しない点に注意すべきである．さらに，各モデルを図示したものを図 2.3 に示す．

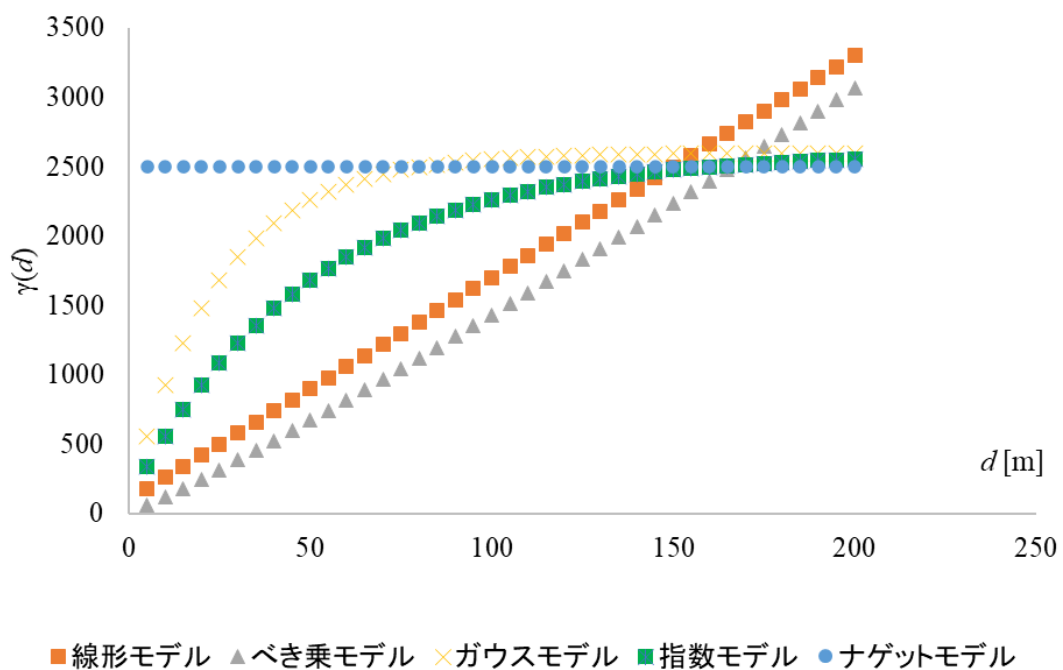


図 2.2 各セミバリオグラムモデルの図

2.5.3. セミバリオグラム関数の決定手順

セミバリオグラム関数を求める手順を書くと次のようになる．ただし，本実

験で用いる理論的セミバリオグラムのモデルは $\widehat{W}(\boldsymbol{x})$ が距離に応じて指数的に減衰することから指数モデルを採用する.

- ① 図 2.4 のように縦軸に $(\widehat{W}(\boldsymbol{x}_l) - \widehat{W}(\boldsymbol{x}_m))^2$, 横軸に 2 点間の距離 d を取って全てのペアをプロットする (ただし, $\widehat{W}(\boldsymbol{x}_l)$, $\widehat{W}(\boldsymbol{x}_m)$ は異なる位置におけるデータとする) . これはセミバリオグラム雲と言われる [10,11].

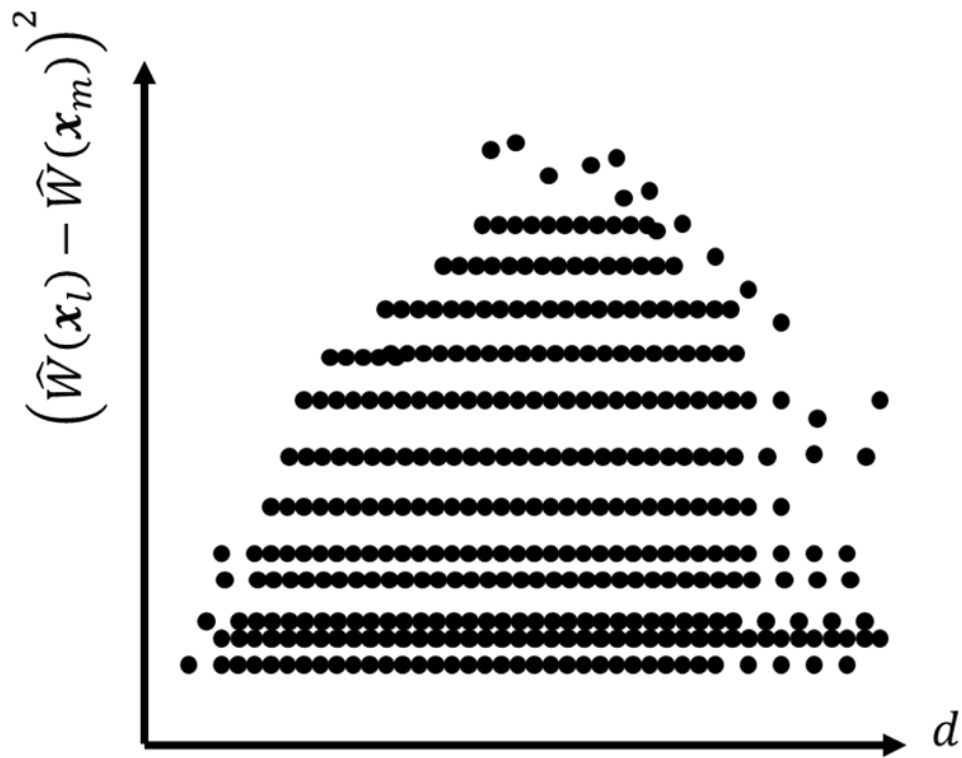


図 2.3 セミバリオグラム雲

- ② 図 2.5 のように①で取ったデータを一定間隔ごとに各経験的バリオグラムを距離方向に平均化する.

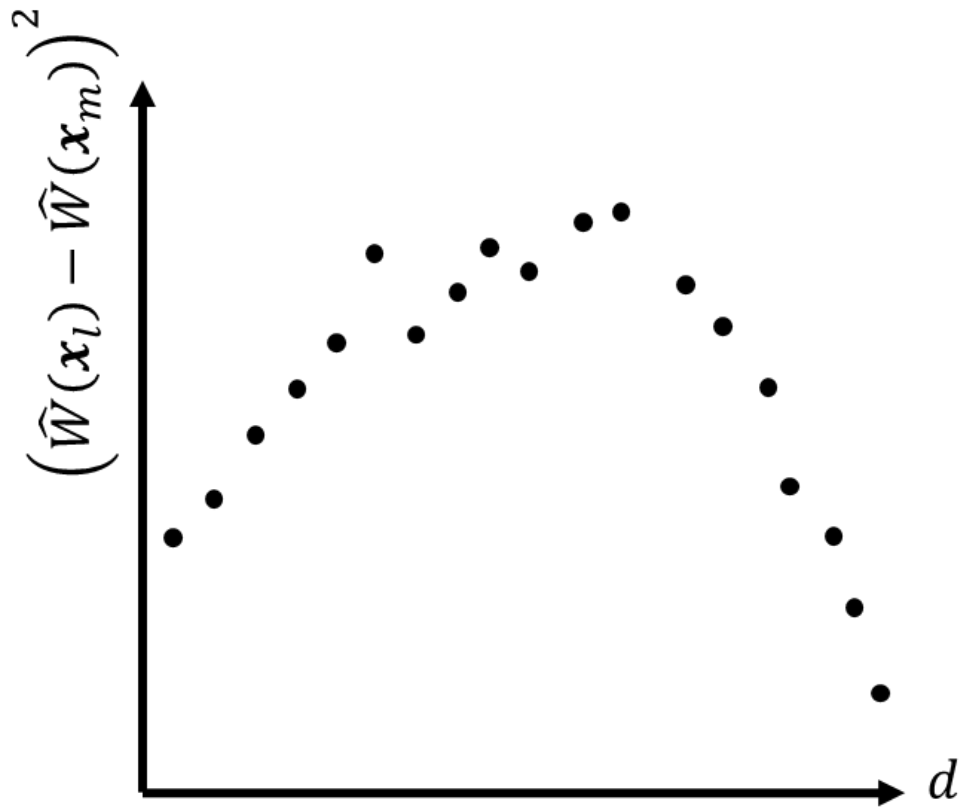


図 2.4 距離方向に平均化した経験的セミバリオグラム

- ③ 図 2.6 のように, ②で平均化した値に対して, 理論的バリオグラムをフィッティングする

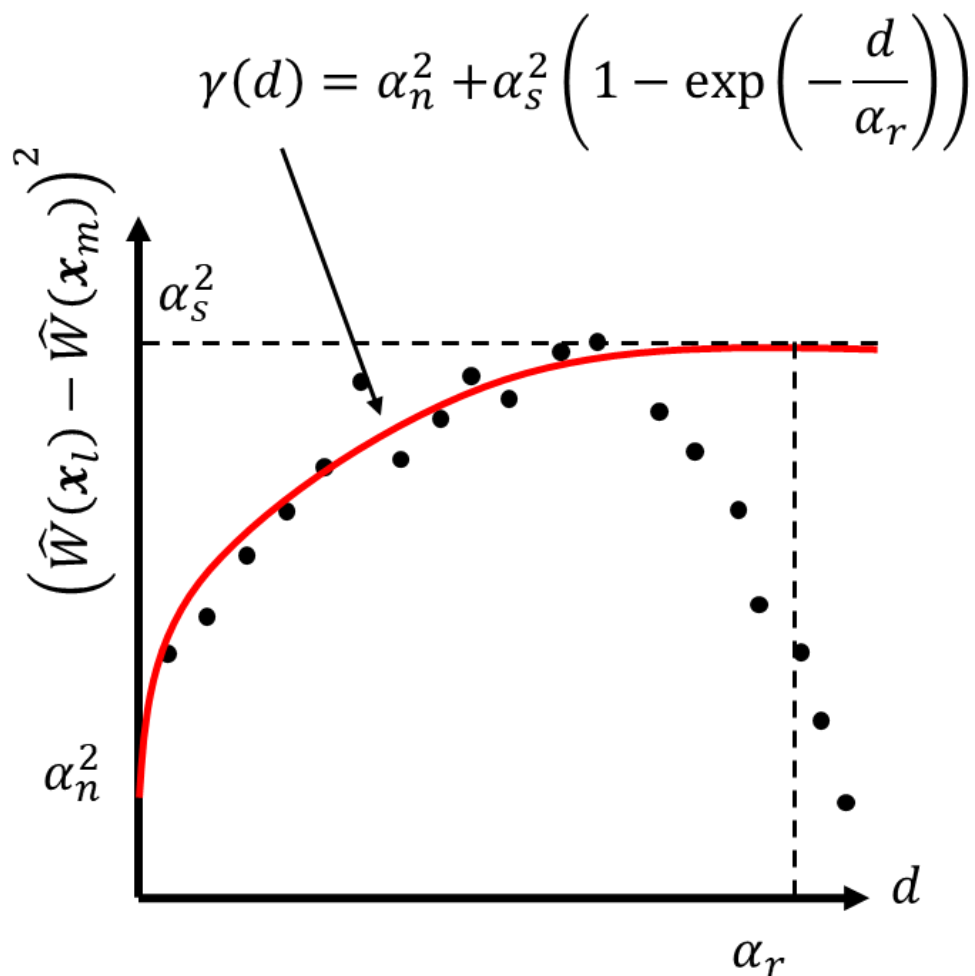


図 2.5 平均化された経験的セミバリオグラムを理論的セミバリオグラムでフィッティングしたもの

2.6. 補間手順のまとめ

2.3～2.5 は Kriging 補間を用いることにより電波環境マップにおいて補間する方法である。これらを簡易的にまとめると次のようになる。

1. データセットから $\hat{W}(x_i)$ を算出
 - 1.1 最小二乗法を用いて $\hat{P}_c, \hat{\eta}$ を算出する.
 - 1.2 $\hat{W}(x_i) = P(x_i) - (\hat{P}_c - 10\hat{\eta} \log_{10} \|x_i - x_{Tx}\|)$ の式にパラメータを入

れて当てはめる.

2. セミバリオグラム関数の式を求める.

2.1 $(\widehat{W}(\mathbf{x}_l) - \widehat{W}(\mathbf{x}_m))^2$ と d を対応させたグラフを描く.

2.2 一定間隔ごとに各経験的バリオグラムを平均化する.

2.3 $\gamma(d) = \alpha_n^2 + \alpha_s^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{d}{a_r}\right)\right)$ の式とフィッティングする.

3. Kriging 補間による補間値 $\widehat{W}(\mathbf{x}_0)$ を出す.

3.1 ラグランジュの未定乗数法を用いて重み係数 w_i を算出する.

4. 最終的な補間式 $\hat{P}(\mathbf{x}_0) = \hat{P}_c - 10\hat{\eta} \log_{10} \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{T_x}\| + \widehat{W}(\mathbf{x}_0)$ にあてはめる.

第3章 建造物付近での電波環境マップ

3.1. 建造物付近での電波環境マップ

位置ごとの平均受信電力値を二次元で地図上に示したマップを電波環境マップと呼ぶ。電波環境マップは、受信電力を実観測することで構築出来るが、立入困難な場所等では、測定値が得られないことから **Kriging** 補間により推定されている。しかし、**Kriging** 補間は距離のみに依存する補間方法であり、建造物付近での **Kriging** 補間による推定値の精度は検証されていない。この研究では、まず、建造物付近での **RSSI** 値を実観測により求める。次に、建造物周辺道路での **RSSI** 値を実観測により求め、**Kriging** 補間により建造物付近における **RSSI** 値の推定値を算出する。建造物付近の実観測値と **Kriging** 補間で求めた推定値を比較し（図 3.1）、建造物付近の **Kriging** 補間の精度を明らかにする。

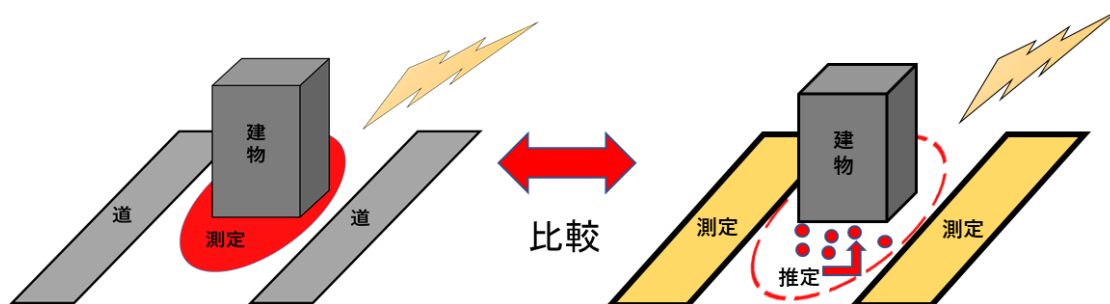


図 3.1 建造物付近での **RSSI** 値の実観測値と推定値の比較

第4章 測定系概要

4.1. LoRa モジュール概要

この節では、本研究で使用する LoRa モジュールについて述べる [12]. 図 4.1 のように開発評価用モジュール ES920LRB とその評価ボード ES920EB, アンテナ ES920ANT を同社標準ソフトウェア上で動作させる. アンテナ ES920ANT と評価ボード ES920LRB は ES920H (図の黒い線のようなもの) によって繋げる. 本稿ではこれらをまとめて LoRa モジュールと呼ぶ. 本研究では LoRa モジュールを送信局, 受信局の両方に用いる.

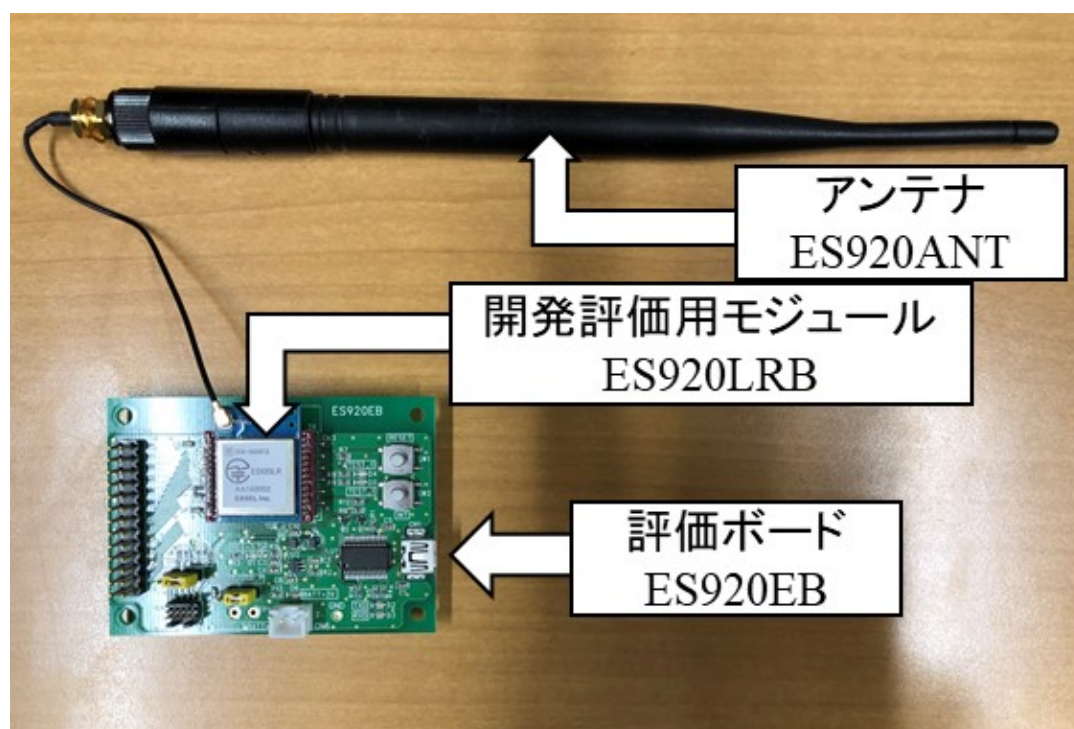


図 4.1 LoRa モジュール

4.2. 送信機概要

この節では送信機の概要について述べる。送信機には図 4.1 に示した LoRa モジュールとノートパソコンを USB ケーブルで接続する。またアンテナを発泡スチロールで固定し、これを三脚の上に設置したものが図 4.2 になる。



図 4.2 送信機の外観

送信局においてアンテナ部分を発泡スチロールで固定するのはアンテナの向きを固定するためであり、電波の影響が少ないからである。また、三脚を用いる理由は送信局の高さをもつためである。また、地面を傷つけないように三脚の脚の下にダンボールを敷くのに注意が必要である。

4.3. 受信機概要

この節では受信機の概要について述べる。受信局には図 4.1 に示した LoRa モジュール, Raspberry Pi 3, モバイルバッテリー, (GPS 機能を用いる場合は GNSS 受信機) を使用する。Raspberry Pi 3 に, モバイルバッテリー, LoRa モジュール, (GPS 機能を用いる場合は GNSS 受信機) を USB で接続し Raspberry Pi 用のディスプレイを HDMI で接続すると図 4.3 のようになる。(本研究では, GNSS 受信機は使用した。)

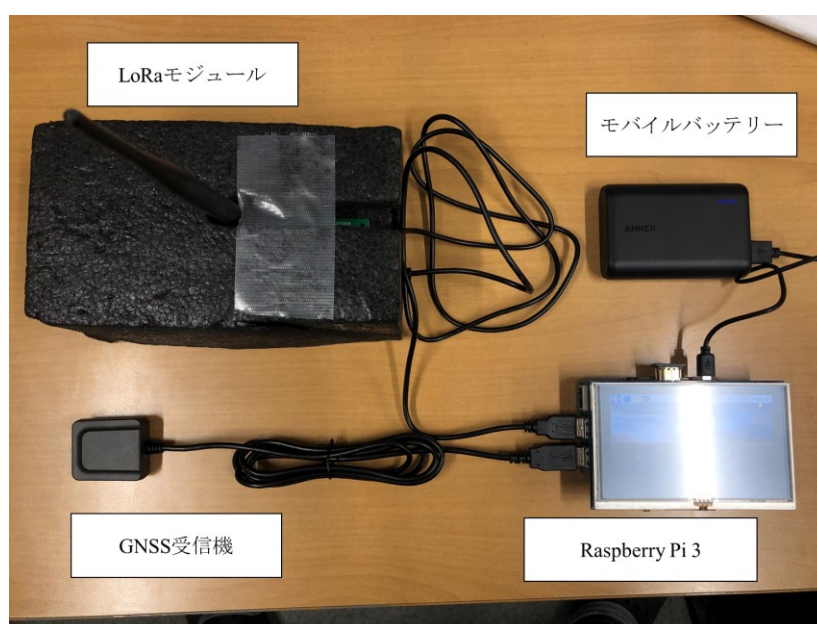


図 4.3 受信局の外観

図 4.3 のまま測定することは困難であるので，図 4.3 の受信機系を図 4.4 のように一つの発泡スチロールにまとめると測定が容易になる。



図 4.4 受信機系を運びやすくしたもの

第5章 実証実験

5.1. 三重大学構内での測定および観測・評価エリアの定義

建造物付近における RSSI 値の Kriging 補間値の特性を調べるために、本研究では三重大学構内において RSSI 値の測定をした。エリアが広くメジャーで位置座標を決めるのは困難であるため位置座標は GNSS 受信機により緯度、経度を取得した。実験諸元は表 5.1 の通りである。また、三重大学構内を実観測により得られた電波環境マップを図 5.2 に示す。観測点は図 5.2 のカラーバー色の箇所であり、10 点以上受信できたものをプロットしている。

表 5.1 実験諸元

測定エリア	三重大学上浜キャンパス内
通信規格	LoRa
送信機の位置	三重大学情報工学科棟屋上
送信時間	61.7ms
送信時間間隔	1sec
送信電力	13dBm
中心周波数	923.2MHz
拡散率	10
帯域幅	125kHz

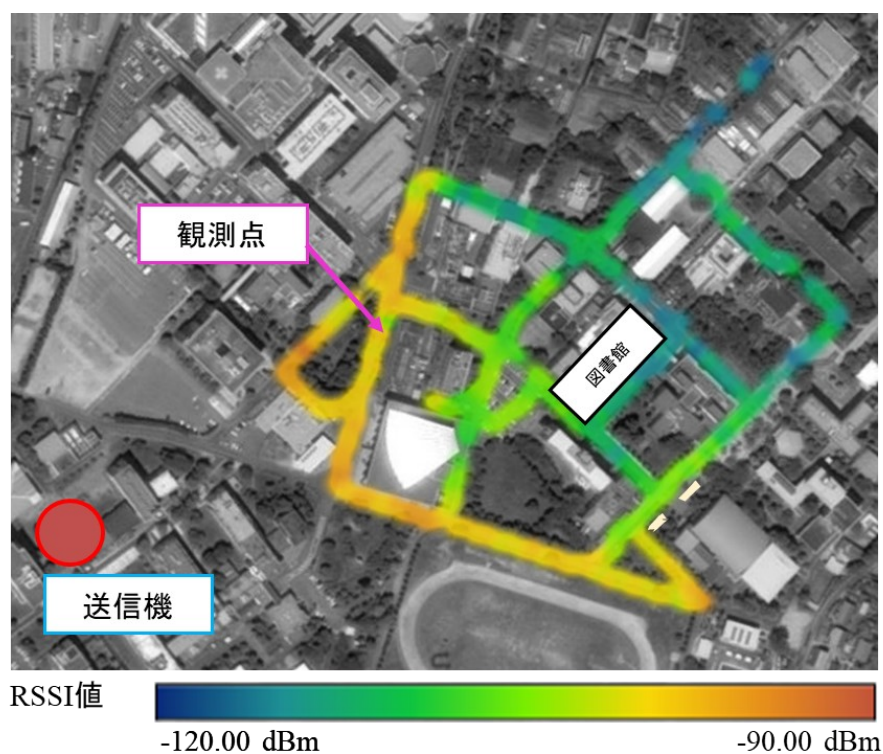


図 5.1 実観測により得られた電波環境マップ

次に、観測エリアの定義について述べる。図 5.2 は三重大学構内により得られた電波環境マップであるが、まず観測エリアを領域 A、領域 B、領域 C の三つに分ける。領域 A は観測値が図書館の影響を受けるエリア、領域 C は観測値が図書館の影響を受けないエリア、領域 B は領域 A と領域 C の和集合 ($B = A \cup C$) である。領域 A、領域 B、領域 C を図 5.3 に示す。また、観測値が図書館の影響を受けないエリアである領域 C を領域 C_1 、領域 C_2 、領域 C_3 に分けた (図 5.4)。ここで C は、($C = C_1 \cup C_2 \cup C_3$) を満たす。したがって、観測エリアは、領域 A、領域 B、領域 C、領域 C_1 、領域 C_2 、領域 C_3 の 7 種類で定義されている。次に、評価エリアの定義について述べる。評価エリアは図 5.5 で示されている図書館裏エリアとする。

次に、補間誤差の定義について述べる。本研究では、補間誤差として RMSE (Root Mean Squared Error) と RMSPE (Root Mean Squared Percentage Error) を用いた。

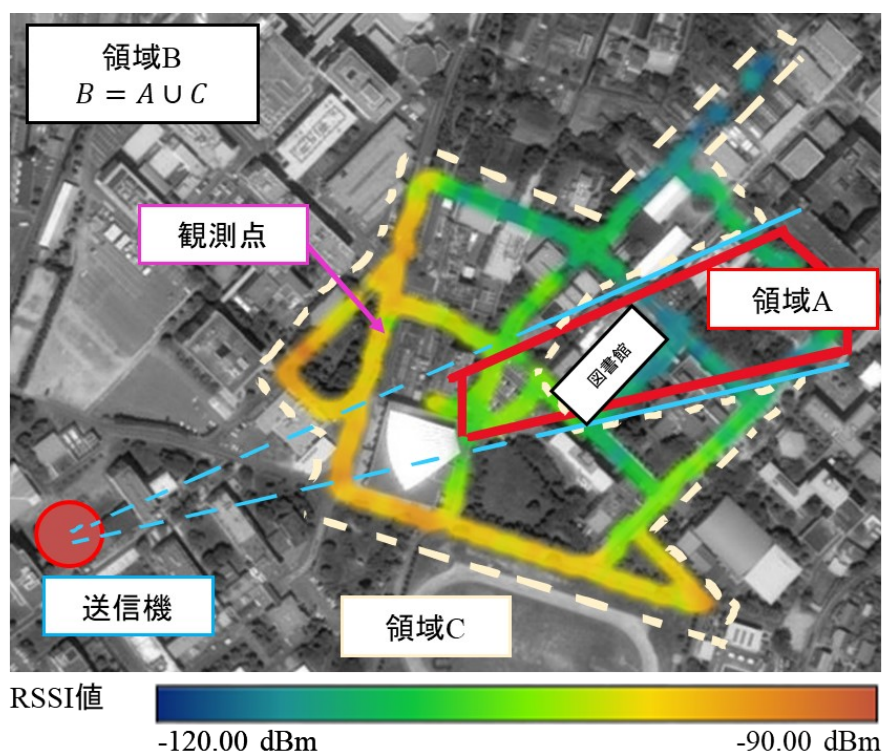


図 5.2 観測エリアの定義 (1)

RMSE と RMSPE の違いとして RMSE は絶対誤差, RMSPE は相対誤差を表す指標である. RMSE, RMSPE の定義式はそれぞれ式(5.1), 式(5.2)のようになる.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_I - x_i)^2} \quad (5.1)$$

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{x}_I - x_i}{x_i} \right)^2} \quad (5.2)$$

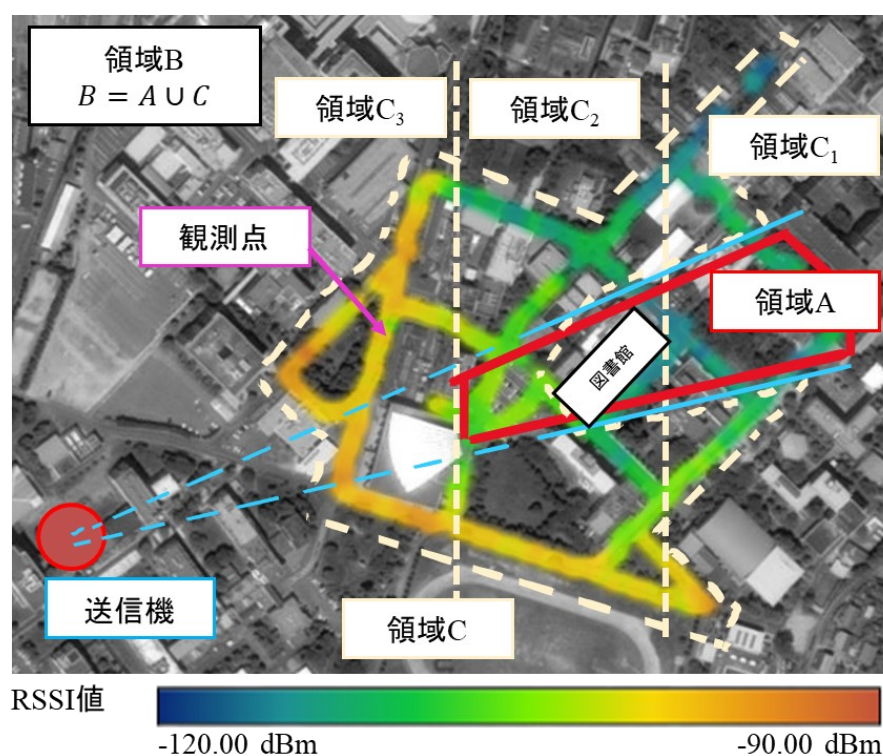


図 5.3 観測エリアの定義 (2)

ここで、 N は観測値（推定値）の総数、 x_i は観測値、 \hat{x}_i は観測値 x_i の推定値を表す。

5.2. 実験結果

本研究では、図書館裏エリアについて **Kriging** 補間を用いて推定値を求めた。表 5.6 に **Kriging** 補間で求めた推定値と観測値の各エリアとの RMSE を、表 5.7 に **Kriging** 補間で求めた推定値と観測値の各エリアとの RMSPE を示す。表 5.6、表 5.7 より補間に用いるエリアが領域 B であるときに RMSE が最小であることがわかる。このことから、建造物付近では補間に用いる観測値数を増やすことで推定精度を向上できることがわかる。また、RMSE 値および RMSPE 値が領域 $B < \text{領域 A} < \text{領域 C} \leq \text{領域 C}_2 < \text{領域 C}_1 < \text{領域 C}_3$ となっていることから、補間エリ

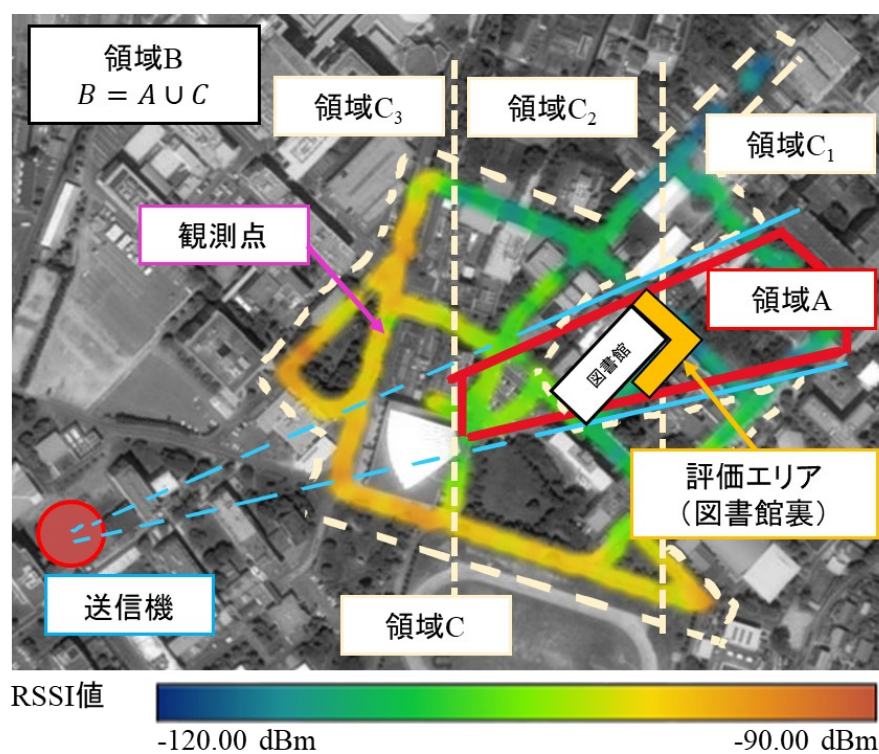


図 5.4 評価エリアの定義

アから近い観測値を得ることで推定精度を向上できることもわかる。

表 5.6 Kriging 補間で求めた推定値と観測値の各エリアとの RMSE

補間に用いるエリア	観測値数	RMSE [dB]
領域 A	185	2.34
領域 B	332	2.28
領域 C	295	3.94
領域 C ₁	54	6.64
領域 C ₂	134	3.95
領域 C ₃	107	8.85

表 5.7 Kriging 補間で求めた推定値と観測値の各エリアとの RMSPE

補間に用いるエリア	観測値数	RMSPE [%]	測定値の平均値[dBm]
領域 A	185	1.99	-114
領域 B	332	1.94	
領域 C	295	3.40	
領域 C ₁	54	5.75	
領域 C ₂	134	3.40	
領域 C ₃	107	7.65	

5.3. 図書館裏エリアの各領域における RMSE の分布

5.2. では、各観測エリアを補間に用いて、評価エリアである図書館エリアを補間したときの RMSE, RMSPE を求め、考察をした。この説では、補間誤差の分布傾向を見るために、図書館裏エリアにおいて RMSE の分布を示す。図 5.8～図 5.13 に領域 A, 領域 B, 領域 C, 領域 C₁, 領域 C₂, 領域 C₃ のそれぞれを補間に用いて図書館裏エリアを推定したときの推定値と実観測値の RMSE のそれぞれの分布を示す。ただし、図中のカラーバーはそれぞれの領域で最大・最小に正規化したものである。

カラーバーの最大・最小は各領域で異なるため補間精度は異なるが、それぞれのマップにおけるそれぞれの RMSE のカラーは似ているため各領域同士で分布傾向は似ていることがわかる。

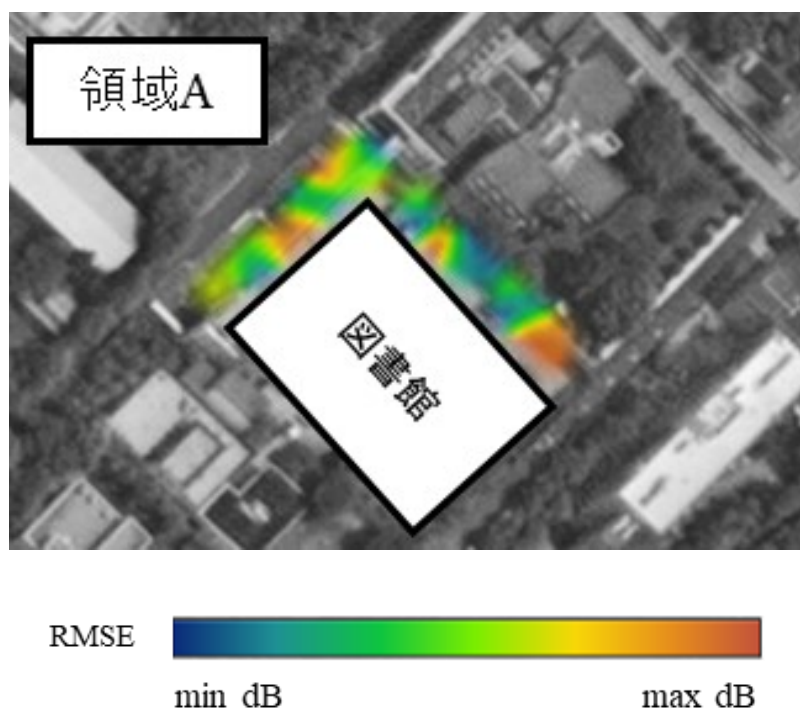


図 5.5 領域 A を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布

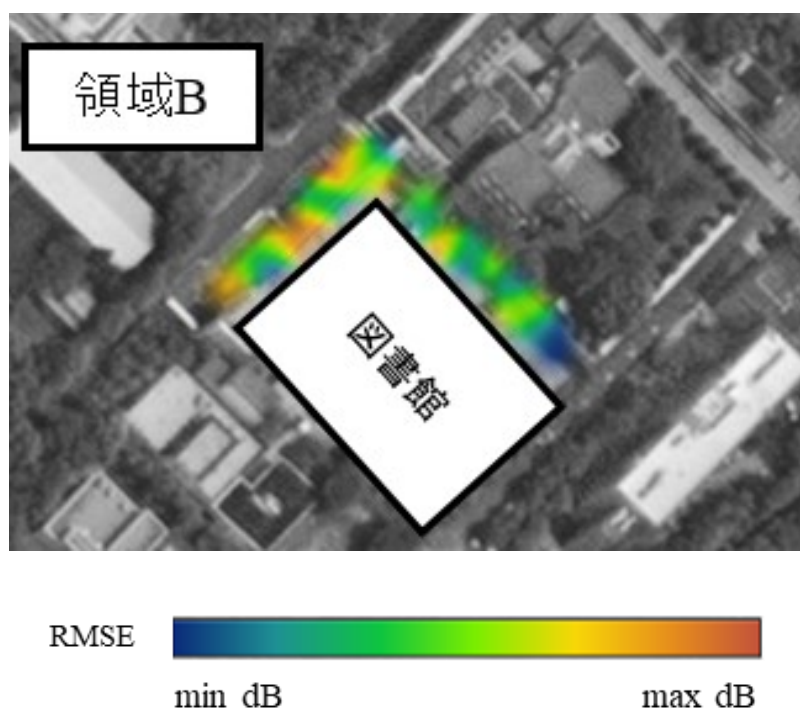


図 5.6 領域 B を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布

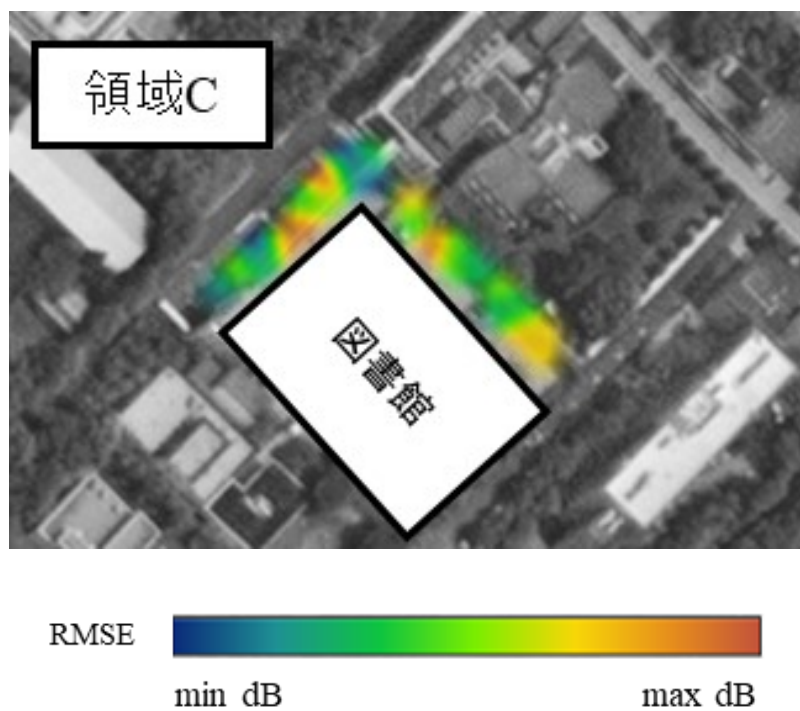


図 5.7 領域 C を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布

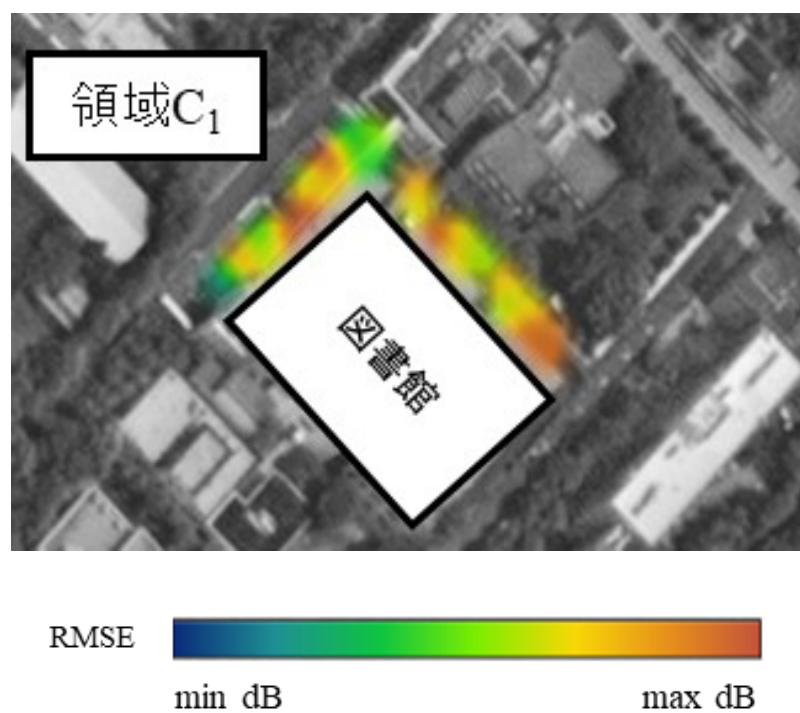


図 5.8 領域 C₁ を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布

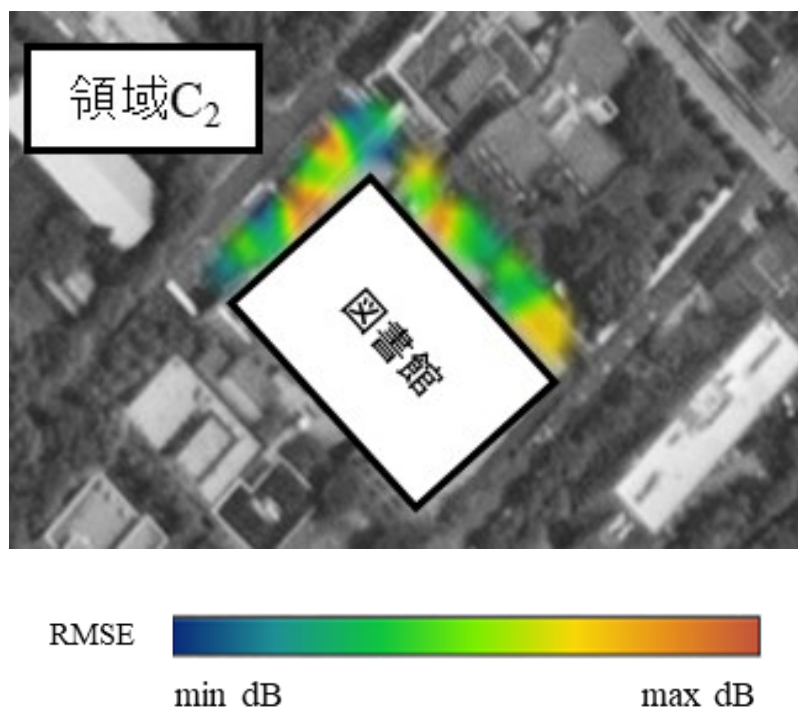


図 5.9 領域 C_2 を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布

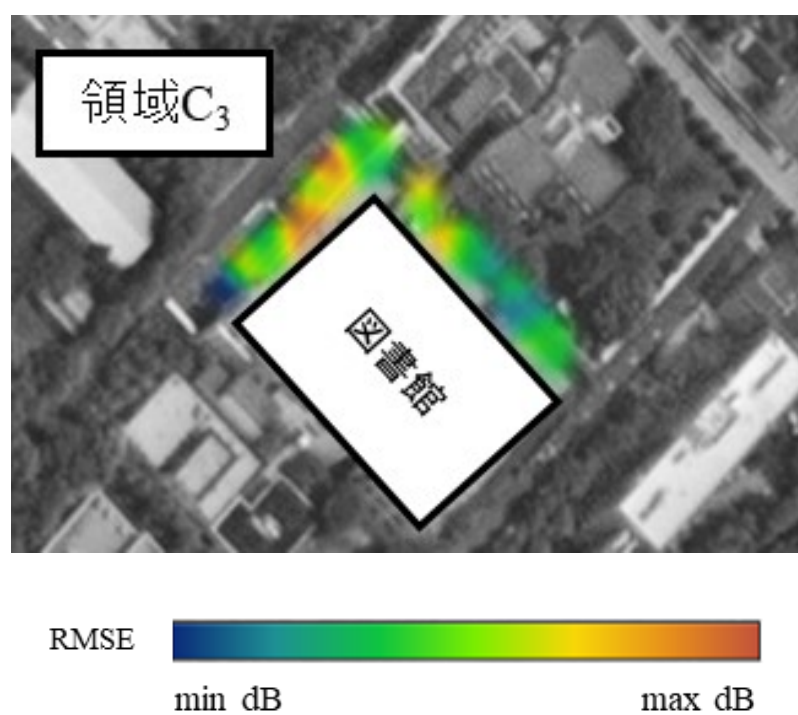


図 5.10 領域 C_3 を用いたときの図書館裏エリアにおける RMSE の分布

第6章 おわりに

6.1. まとめ

本研究では、建造物付近における RSSI 値の Kriging 補間値の特性を調べるために 920MHz 無線信号を用いた建造物付近の Kriging 補間値の精度評価をした。この精度評価をするために、三重大学構内において LoRa モジュールを用いて実際に RSSI を観測した。観測した RSSI 値を領域 A, 領域 B, 領域 C, 領域 C₁, 領域 C₂, 領域 C₃ の六つの観測エリアに分けた。領域 A は観測値が図書館の影響を受けるエリア, 領域 C は観測値が図書館の影響を受けないエリア, 領域 B は領域 A と領域 C の和集合 ($B = A \cup C$) であり, 領域 C₁, 領域 C₂, 領域 C₃ は領域 C を 3 分割したものである。これら六つの観測エリアを補間に用いる箇所とし, それぞれを用いて評価エリアとした図書館裏エリアを Kriging 補間により推定値を求めた。この各領域から求めた Kriging 補間による推定値と事前に測定した実観測値の RMSE (RMSPE) を求めることにより補間誤差を算出した。結果として, 補間に用いるエリアが領域 B であるときに RMSE が最小であることがわかった。このことから, 建造物付近では補間に用いる観測値数を増やすことで推定精度を向上できることがわかった。また, RMSE (RMSPE) が領域 B < 領域 A < 領域 C ≤ 領域 C₂ < 領域 C₁ < 領域 C₃ となっていることから, 補間エリアから近い観測値を得ることで推定精度を向上できることもわかった。

さらに, 補間誤差の分布傾向を見るために, 図書館裏エリアにおいて RMSE の分布を示した。結果として, 補間精度は異なるがそれぞれのマップにおけるそれぞれの RMSE のカラーは似ているため各領域同士で分布傾向は似ていることがわかった。

6.2. 今後の課題

本研究では建造物の対象として図書館を選び Kriging 補間値の特性を評価した。しかし、建造物のサンプル数を増やす必要がある。建造物の対象として、例えば、三重大学上浜キャンパス内の総合研究棟 I を選び、総合研究棟 1 付近 Kriging 補間値の特性を見る必要がある。

参考文献

- [1] https://mono-wireless.com/jp/tech/Internet_of_Things.html
- [2] 鈴木一哉, 森本昌治, 岩井孝法, ”IoT 技術の最新動向,” 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, vol.12, No.1, pp.12-20, 2018 年
- [3] <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/n3300000.pdf>
- [4] 佐藤光哉, ”電波環境マップに基づく周波数共用の理論と課題,” 信学技報, SR2018-127, pp.43-49, 2019 年 3 月.
- [5] K. Sato and T. Fujii, “Krigin-Based Interference Power Constraint: Integrated Design of the Radio Environment Map and Transmission Power,” IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw., vol. 3, no. 1, pp. 13-25, Mar. 2017.
- [6] K. Sato, K. Inage, and T. Fujii, “Spectrum Database-assisted Radio Propagation Prediction for Wireless Distributed Networks: A Geostatistical Approach,” in Proc. 2016 IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC2016)
- [7] K. Sato, K. Inage, and T. Fujii, ”Modeling the Kriging-Aided Spatial Spectrum Sharing Over Log-Normal Channels,” IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 8, no. 3, pp. 749-752, June 2019.
- [8] 佐藤光哉, 稲毛契, 藤井威生, ”ニューラルネットワークおよび空間内挿に基づく電波環境マップ構築に関する一考察,” 信学技報, SR2018-106, pp.63-70, 2019 年 1 月.
- [9] <http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~yamasita/interpolation.pdf>
- [10] <https://www.msi.co.jp/splus/learning/spatial/3-1.html>
- [11] 佐藤光哉, ”無線環境の可視化: 空間統計学の基礎とその多次元拡張,” 信

学技報, SIP2021-30, pp.12-17, 2021年8月.

- [12] 稲垣健太, 成枝秀介, 藤井威生, 梅林健太, 成瀬央, ”アウテージ解析によるLoRa/LoRaWAN電波伝搬特性の評価,” 信学技報, SR2018-125, pp.1-6, 2019年3月.

研究業績

1. 宮本椋生, 成枝秀介, 藤井威生, 成瀬央, "建造物付近における RSSI Kriging 補間値の特性, " 2021 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-17-10, 2021 年 9 月.

謝辞

本研究の遂行に当たり、ご指導頂きました三重大学大学院工学研究科准教授成枝秀介先生に厚く御礼申し上げます。

本研究に対して、貴重なご助言を賜りました、三重大学大学院工学研究科教授成瀬央先生、真鍋哲也先生に深く感謝致します。また、研究物品の手配など研究室の庶務に関わる面で、大変お世話になりました落合美子様感謝申し上げます。

研究生生活を通してさまざまな助言や刺激を頂いた北村祥太氏、小嶋隆氏、清水省吾氏、平井尚輝氏、立岡利茂弥氏をはじめとする諸先輩方に深くお礼申し上げます。また、パターン情報処理研究室での研究生生活を共に過ごし、支えてくれた隈元大輔君、小川蓮君、黒川貴矢君ら後輩達に感謝申し上げます。

最後に、これまで学生生活を温かく見守り、本学修了まで惜しみない支援をしてくれた家族に心から感謝致します。

付録 RSSI 観測値の図示方法

この付録では、RSSI 観測値の図示方法を説明する。本研究では、Microsoft 社の Excel に搭載されている 3D マップの機能を用いることで、観測した RSSI 値を位置情報に基づいてカラーマップで表すことができ、RSSI 値の可視化が可能となる。

3D マップの使い方は以下の通りである。

1. 位置座標（緯度，経度）と観測値を含めたデータセットを Excel ワークシート上に用意する。
2. データセットを選択し，右クリックでコピーをクリックする。
3. データタブをクリックしデータモデルの管理をクリックする。
4. データモデルの管理のウィンドウが現れたら左上にある貼り付けをクリックして，適当な名前を付けてデータモデルに保存する。
5. 今開いている Excel ウィンドウを一度消さないとデータが反映されないの
で，一度消してからもう一度同じ Excel ファイルを開く。
6. 挿入タブをクリックし，3D マップ→3D マップを開く→新しいツアーをク
リックする。
7. 3D マップのウィンドウが現れるので，レイヤーウィンドウで視覚エフェク
トをヒートマップに可視化を選ぶ（右から 2 番目）。場所，値にはデータ
モデルに登録した位置座標，観測値を選択する。ただし，値の項目はデフ
ォルト設定だと（合計）になっているので集約なしを選択する。また，レ
イヤーのオプションからビジュアル集計を平均にする（デフォルトだと合
計になっている。）。

8. 影響半径を調整すると 3D マップ上にきれいにプロットされる。
9. 最後に、Shift+↑キーを用いるとマップを上を傾けることができるため、最大まで上を傾けるとマップが見やすくなる。

3D マップの簡単な使い方は上で示した通りであるが、本研究ではシーンタブのテーマからエアリアルダークを選択するとマップが見やすくなったため適切なテーマを用いるとマップが見やすくなることもある。