

低高度 UAV センシングによる放射能除染のための
地上線量率の推定に関する研究

2023 年 9 月

鬼川 凌

目 次

第 1 章 序 論

1.1 研究背景	- 1 -
1.2 研究目的	- 1 -
1.3 研究経緯	- 2 -

第 2 章 低高度 UAV センシングによる放射線量率マッピングの課題

2.1 はじめに	- 5 -
2.2 放射線量率マッピング	- 5 -
2.3 FSM を用いて地上放射線量率を推定する方法	- 6 -
2.4 ANN を用いて地上放射線量率の機械学習を行う方法	- 11 -
2.5 地表付近の空間放射線量率の減衰率特性に関する課題	- 15 -
2.6 まとめ	- 16 -

第 3 章 地表付近の減衰率特性を考慮した放射線量率マッピング

3.1 はじめに	- 18 -
3.2 放射線源からの距離と放射線減衰率の観測実験	- 18 -
3.2.1 鉛直方向の放射線減衰率	- 20 -
3.2.2 水平方向の放射線減衰率	- 21 -
3.2.3 低高度 UAV センシングにおける放射線源の影響	- 22 -
3.2.4 加重平均化を行う提案手法の考え方	- 23 -
3.3 前処理: 測定データの直交座標系への変換	- 27 -
3.4 提案手法	- 27 -
3.4.1 Step1: 直線距離を用いた推定値の加重平均化	- 27 -
3.4.2 Step2: 垂直成分と水平成分の距離補正	- 29 -
3.5 実験	- 30 -
3.5.1 実験目的と概要	- 30 -
3.5.2 観測場所	- 31 -
3.5.3 使用した計測機器	- 31 -

3.5.4	歩行計測による地表の測定データ	- 31 -
3.5.5	UAV 計測による測定データ	- 31 -
3.5.6	パラメータフィッティング	- 33 -
3.5.7	推定結果	- 34 -
3.5.8	マッピング結果	- 38 -
3.5.9	考察	- 38 -
3.6	まとめ	- 40 -

第 4 章 空乏領域検出法を用いた地上放射線量率の推定誤差の解析

4.1	はじめに	- 41 -
4.2	空乏領域判定法	- 41 -
4.3	実験と結果	- 43 -
4.3.1	実験目的	- 46 -
4.3.2	実験方法	- 48 -
4.3.3	実験結果	- 50 -
4.4	まとめ	- 53 -

第 5 章 結 言

5.1	研究で得られた成果	- 55 -
5.2	今後に残された課題	- 57 -

謝辞	- 58 -
----	--------

論文リスト	- 59 -
-------	--------

参考文献	- 62 -
------	--------

付録 A 実験データと統計 - 65 -

付録 B 提案手法の補正係数に関する参考資料 - 75 -

付録 C 空乏領域判定法 - 78 -

1. 序論

1.1 研究背景

福島第一原子力発電所の事故後に避難指示解除を目指し放射能除染の作業が原子力災害対策本部を中心に計画される中、放射能除染を計画する区域で除染作業を行うには、数メートルのメッシュ単位の高い解像度で地上の放射線量率マップが必要となる [1][2]。放射線量率のマップを作成するにあたり、除染作業中に歩行計測を行うことで地上 1m の放射線量率（地上放射線量率）を直接測定し、その測定値を用いて各座標にマッピングすることもできるが、歩行計測は労力を要するだけでなく山地斜面等では侵入が困難な場所も多いため、測定可能な範囲が限定される。そこで、歩行計測に加え、放射線検出器を搭載する無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle）を用いて空間の放射線量率を測定し、測定値から地上放射線量率を推定する手法が期待されている。特に数メートルのメッシュ単位の解像度で放射線量率マップを作成するには、地上から高さ 100m 以上で実施する一般的な UAV センシングよりも低い高さ 50m 以下の高度で放射線量率を測定する『低高度 UAV センシング』を用いた地上放射線量率の推定が求められる。ただし、低高度 UAV センシングの測定値を用いて地上放射線量率を推定するとき、地上の起伏等の影響による地表の不均一な放射線源を考慮する必要がある。このため、放射線源が均一にあると仮定する従来の地上放射線量率の推定手法を低高度 UAV センシングに適用する場合、推定値が実測値から乖離する問題があることが報告されている [3]。また、数メートルのメッシュ単位で放射線量率を測定する低高度 UAV センシングにおいては、UAV 飛行経路の揺らぎや測定点数の不足により推定誤差が拡大する領域（空乏領域 [4]）が出現する問題も指摘されている。

1.2 研究目的

本研究では、数メートルのメッシュ単位の高い解像度で放射線量率マップを作成するために、高さ 50m 以下の低高度 UAV センシングの測定値を用いて地上放射線量率を推定する手法を明らかにすることを目的としている。そのために本研究では、地表付近の放射線量率の減衰率特性を考慮し、低高度でも適用可能な補正の方法を検討し、従来手法の拡張を試みる。UAV センシングで測定した空間の放射線量率から地上放射線量率を推定する方法を提案した後、従来手法との比較検証を行う。原子力災害に

関する帰還困難区域付近（福島県第一原子力発電所から 10km 以内の観測領域）の実験から、従来手法と提案手法の推定誤差やそれらの特徴を比較し、低高度 UAV センシングにおける提案手法の有効性を明らかにする。

1.3 研究経緯

本節では、本研究を開始するにあたり動機となった先行研究について説明する。

(1) 土地被覆に基づく放射線量率マッピング

先行研究として、2011 年 3 月の東日本大震災以降、現場の面積を占める農地や森林地帯など複数の土地被覆が混在する箇所の地上放射線量率の分布を観測可能とすることに焦点を合わせ、土地被覆の種類に応じて地上放射線量率を求めるための補正式を選択し、放射線量率マッピングを行う大山らの研究 [5] [6] [7]がある。この研究は複数の土地被覆が混在する領域で除染すべき箇所の優先順位的意思決定や除染箇所の漏れを防ぐことを目標としている。

この先行研究では最初に、UAV センシングによって観測地点付近で地上放射線量率を求めるための補正式に使用するパラメータを決定するためにサンプルデータが UAV センシングで都度得られることを前提とし、地上からの高さと同空間放射線量率のデータ集合から最小二乗法を用いて距離に関する放射線減衰率を土地被覆の種類に応じて求めている。次に、UAV センシングで得られた画像や地球観測衛星の画像を基に、教師付き学習で分類した土地被覆の種類（平地や森林等）を用いて、放射線量率マッピングで対象とする各セルに土地被覆の種類を表すラベルを付加する。その後、放射線量率マップ上の各セルについて、土地被覆の種類に対応する地上放射線量率を求めるための補正式を用いて地上放射線量率に換算する。この手順で上空の放射線量率の測定結果から地上放射線量率を推定するために、土地被覆、標高地図、UAV センシングで得られる空間放射線量率の 3 種類のマップを使用する。地形が複雑な領域で UAV センシングを行うときに土地被覆を活用する本アプローチの有効性は高い。

この先行研究で主に残された課題として、上空の放射線量率から地上放射線量率を求めるとき、各セル内の上空の測定結果のみを使用している。しかし、実際には UAV センシングの測定結果は各セルの周囲にある様々な地形の放射線源の影響を受ける。各セルの外側における UAV センシングの測定結果は直接考慮されていない。地上放射線量率の推定値を求めることができた有効セルから周囲のセルの地上放射線量率を逆距離荷重法やクリギング法によって推定値を補間するアプローチも検討されて

きたが、しかし、そもそも各有効セルにある推定値はセル内の測定結果のみによる計算結果である。低高度 UAV センシングの高さでは、特にこの影響は無視できないことが先行研究で明らかになったことは、本研究の最初の動機にあたる。

(2) 減衰行列を用いた逆問題のアプローチ

UAV センシングで測定した結果は、森林樹冠も含めて様々な角度の放射線源からの影響を受ける。本研究を開始する前に筆者らは、Figure 1.1 のように、障害物の影響が少なく UAV で測定することが最も容易な高さ 50m を基準として、UAV の高さで得られる測定値が周囲の地表からも放出して重畳された放射線量率の影響を受けていることを考察し、減衰行列と空間の放射線観測値ベクトルの積を用いて、直交座標上でベクレル (Bq) 単位の放射線源に相当する量として地表の放射線量を表す行列を求め、次に、その逆行列を用いて UAV の高さの放射線量率から地上 1m の放射線量率に換算し直す方法 (逆問題) を議論した。

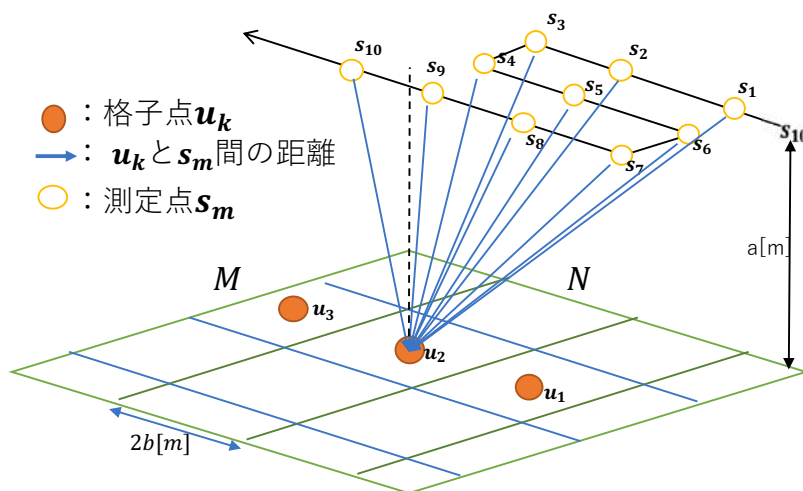


Figure 1.1 放射線観測値ベクトルと地上放射エネルギーの関係

しかし、逆行列を用いて UAV の高さの放射線量率から地上 1m の放射線量率を推定することは不安定な問題を解くアプローチであることは知られている [8]. 特に本研究で扱う低高度 UAV センシングでは、近傍の不均一な放射線源の影響や地表の起伏の影響を受けた測定結果が含まれる。それらの影響を正確に取り扱う必要があり、逆問題の解を求める際に適切な正則化の選択や放射線減衰率の補正係数を表すパラメータの調整が重要であることが知られている [9].

他に関連する先行研究として、逆問題解析手法であり、かつ、逐次近似法の一つである MLEM (Maximum Likelihood-Expectation Maximization method) を用いて空中の放射線量率から地上放射線量率を推定した結果について報告されている [8] [10]. このアプローチにおいても、MLEM で求めた結果をそのまま使用すると、測定誤差及び設定パラメータの誤差を原因として、地上放射線量率の実測値と推定値の間に大きな乖離が生じるケースが見られることが報告されている.

本研究では、以上の逆問題について、地表の推定点の直上にある測定点と推定点から離れた測定点を比較した際、推定点から UAV までの高さや直線距離の違いが大きく影響を及ぼすことから着想を得て、以降の 2 章で従来研究の問題点を考察し、続く 3 章と 4 章で低高度 UAV センシングにおける地上放射線量率の新たな推定法とその有効性について議論し、5 章で本研究により得られた成果と今後に残された課題についてまとめる.

2. 低高度 UAV センシングによる放射線量率マッピングの課題

2.1 はじめに

本章では放射線量率マッピングにおいて、UAV センシングで得た測定値から地上放射線量率を推定するために従来から使用される FSM (Flat Source Model) と、地上の起伏や土地被覆の種類等の地形情報を考慮し機械学習を用いて地上放射線量率を推定する ANN (Artificial Neural Network) 等の従来手法について、低高度 UAV センシングの測定値に適用する場合の問題を述べた上で、地上放射線量率の新たな推定法を検討する本研究における課題を示す。

2.2 放射線量率マッピング

2011 年の福島第一原発事故以来、復興対策に活用すべく日本原子力開発機構 (JAEA: Japan Atomic Energy Agency) は、地上からの高さ 300m から迅速な有人の航空機モニタリングを実施し、メッシュあたり 250m の大きさで放射線分布マップを作成してきた [11]. 広域の放射線マッピングは、汚染情報の把握と避難指示の発令に特に有効である。その後も航空機モニタリングが継続され、被災後の「避難指示解除準備区域」の効果的な調査と除染には、メートル単位の地上分解能を持った放射線マップの即時入手性 [12]が重要となり、森林部や市街地などの土地利用の種類によっては適切な減衰率が異なることも報告されるようになってきている [13].

放射線量率マッピングは、時間効率を優先するとき一定高度のみの絨毯飛行によるセンシング結果を得て、メッシュ状の地上放射線量率を可視化することが多い。中型以上の航空機でセンシングした場合、飛行高度や地表の起伏に比べて観測領域が広いためにマップ上のセルサイズも大きくなり、隣接するセルの各地点からの影響は十分に無視できる。そのため、観測対象の放射能密度が十分に一様で平坦な地表であると見做して、上空で得られた測定値を地上放射線量率に換算し、欠損値のある地点の放射線量率を逆距離加重法で補間することにより、基本的には地上放射線量率が推定できる。しかし、避難指示解除を目指している住宅地区においては、除染や調査のためによりメートル単位の詳細な放射線量率マッピング結果が重要となる。

小型の UAV を地上からの高さ 50m 以下の低高度で連続飛行させて高い解像度の放射線量率マップを生成する場合、地表に比較的近い UAV で得られる測定値は、平地

面だけでなく様々な高さから放出した放射線の重畳であることを考慮する必要が生じる。これに対し、地表の地盤の標高や建物や樹木などの相対的な高さを含む地形情報を組み入れて機械学習で地上放射線量率を予測する UAV センシングのアプローチ [14] [15] も報告されているが、低高度 UAV センシングの測定結果はほとんど使用されてこなかった。UAV センシングの場合、高さ 1m から 50m 付近に変化する測定結果を効率的に活用しうる。地表に出来るだけ近い位置から測定結果を得る UAV センシングのアプローチは、放射線量率マッピングの効率化に寄与する可能性がある。

2011 年に起きた福島第一原子力発電所事故以降、様々な手法で放射線量率測定や放射線量率マッピングが行われている。従来の地上放射線量率の推定手法として、以降の節で議論される放射線源が均一にあると仮定する推定法や、放射線減衰率に関する係数と測定値を表す行列を組み合わせ、逆行列を計算する推定法、機械学習モデルのように様々な条件下の学習データを訓練する推定法が存在する。しかし、従来の推定手法を低高度 UAV センシングに適用する場合、それぞれの問題が生じるため、それらの解決を考える必要がある。

2.3 FSM を用いて地上放射線量率を推定する方法

最初に、平面に十分近い地表で線源が均一に分布していると仮定できるときに有効となる基本モデルとして FSM [11] [16] がある。FSM は、IAEA (International Atomic Energy Agency) のガイドライン [17] や JAEA が採用する MMGC 法 (Man Made Gross Count method) [11] に準じ、バックグラウンドの放射線量率を排除した後に高度を補正するための放射線の減弱係数 (AF : Attenuation Factor) を、式 (2.1) のように指数近似によって求めてから、線量率換算係数 (CD : Conversion factor of Dose rate) で飛行中の放射線量率の測定値を表す CR ($\mu\text{Sv/h}$ または cps) を地上 1m の放射線量率 D_{1m} ($\mu\text{Sv/h}$) に換算する。そのための事前実験として、対象領域の座標上で測定点のサンプルデータから AF 値を求めた上で、地上 1m の放射線量率の平均値と一定高度のホバリングで測定した空間の放射線量率を比較して CD 値を求める。 AF 値を求めるために従来研究では、空間の放射線量率や地形の変化が少ないテストラインを設定し、その上空において高度を変化させてフライトを実施する。各高度で得られた放射線量率の測定値を高度ごとに平均化し、高度と計数率の相関を 1 次の指数関数でフィッティングして得られた傾きを AF 値とする。Figure 2.1 は、 AF 値を求める際のテストラインフライトのイメージである。

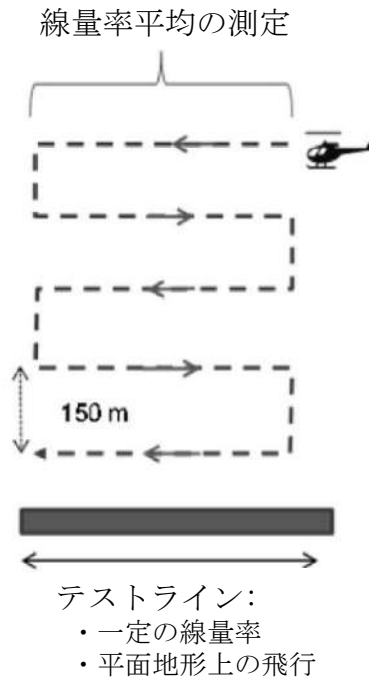


Figure 2.1 AF 値の決定の例(出典 [11])

*CD*値は、基準高度における空間放射線量率から地上放射線量率に換算する係数である。空間の放射線量率への換算係数は基準高度でホバリングして得た平均計数率とホバリング地点の直下の地上において測定したデータと比較して求める。地上放射線量率の測定データは半径 1000m の範囲を NaI シンチレーション式サーベイメータ(日立製作所製 TCS-171B) を用いて 60 点以上の地点を測定する。測定した空間線量率の平均値と上空で 3 分間ほどホバリングして得た平均計数率を比較して*CD*値を求める。Figure 2.2 は*CD*値を求めるためのホバリングフライトイメージである。

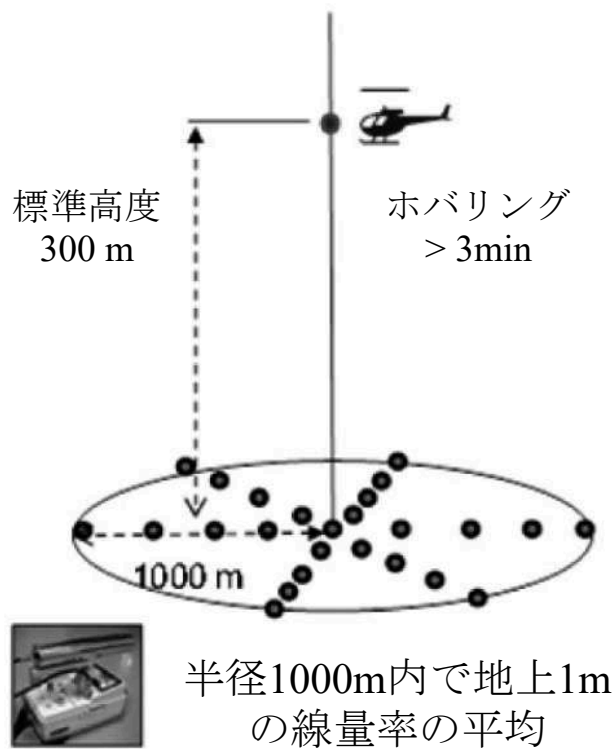


Figure 2.2 CD 値の決定の例(出典 [11])

ここで、以下の式 (2.1) の基準となる対地高度 h_{std} は、航空機モニタリングの場合に 300m を標準としている [11]。本研究の UAV センシングを扱う実験では、測定を行う UAV の基準の高さが 55m であったため、 h_{std} をその値に設定し、FSM を用いて比較検証している。各セル座標上の推定値を求めた後で、欠損値のセルがあれば、逆距離加重法を用いて補間することが基本となる。

$$D_{1m} = CR \cdot \frac{e^{-AF \cdot (h - h_{std})}}{CD} \quad (2.1)$$

上記の計算方法は、基準の対地高度 h_{std} の放射線量率から同じ平面座標上の地上放射線量率をCD値で換算するので、両者の放射線量率が十分比例するような面線源を仮定できる空間で使用することを想定している。そのため、有人機の航空機モニタリ

ングをベースとして実験を繰り返される中で，地上からの高さ 50m 以下の測定結果は基本的に対象外であった．起伏のある箇所や土地被覆の差（平地や森林，市街地など）は誤差要因となるので地形に応じた距離補正 [13]が行われてきたが，それでも高さ 50m 以上の航空機モニタリングを前提としていた．その後の研究では，大型の航空機から小型の UAV センシング，そして車両を用いた場合の比較 [18]も進んできている．車載用の放射線検出器を用いて自動車走行サーベイで航空機モニタリングの結果と詳しく比較した報告 [3]もある．この場合では，放射線検出器の高さが一定であることから高さ成分を排除し，CD値で換算することにより比較検証を行っている．

FSM の問題点として，50m 以下の低高度における推定に適していない点とデータが欠損した場合に使用される逆距離荷重法が適していない点が挙げられる．FSM は，地表が平面かつ線源均一であると仮定して換算を行う方法で，測定高度から減衰率を算出し換算を行っている．Figure 2.3 は，FSM による換算方法のイメージを表している．高さ 100m 以上で測定する場合，高度に対して地表面の影響は少ないと考えるため影響を無視することができる．

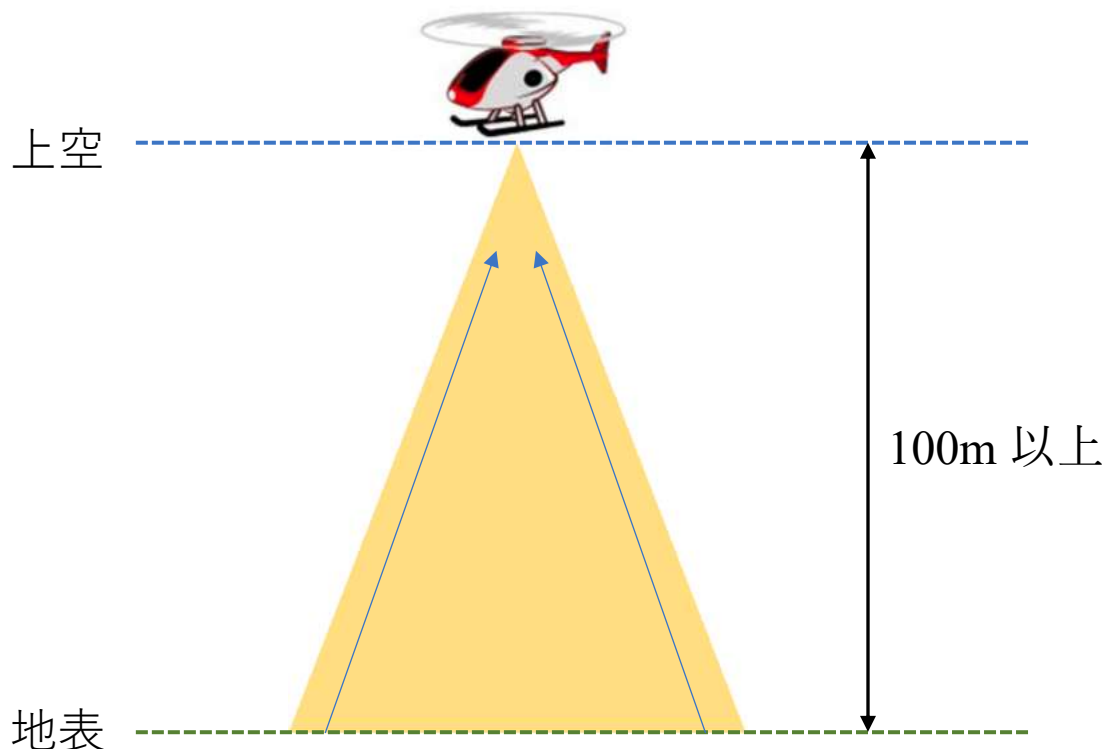


Figure 2.3 FSM による換算方法

低高度 UAV センシングの場合は、測定を行う高さが低い分測定範囲も狭まる。Figure 2.4 のような局所的に放射線量率が高い箇所（ホットスポット）が存在すると測定データに大きな影響を及ぼすため、推定誤差を生じさせる可能性がある。

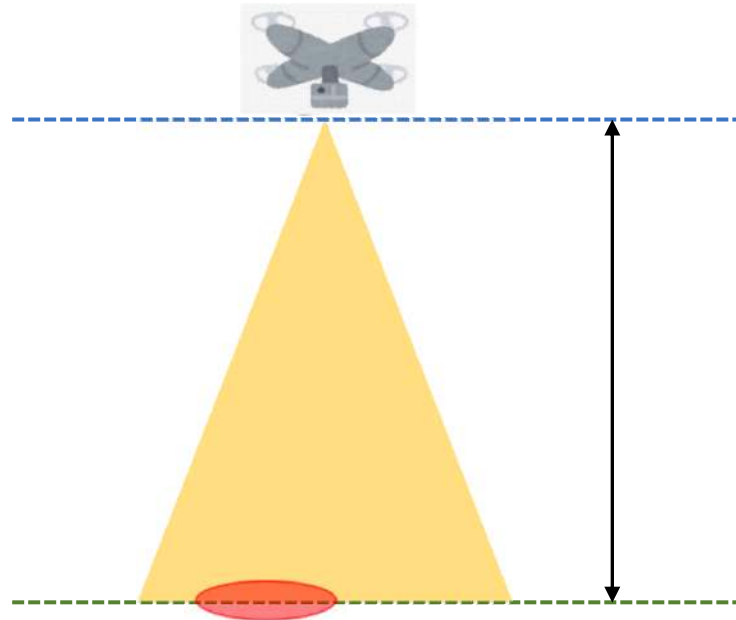


Figure 2.4 低高度における FSM による換算方法の問題

以下の Figure 2.5 は FSM を高さ 300m の有人ヘリコプタモニタリング [11]と高さ 30m の UAV モニタリング [3]で適用したグラフである。有人ヘリコプタでは、約 3km のテストラインを設定し、その上空における高さを変化（150, 300, 450, 600, 750, 900 及び 1500 m）させてフライトを実施し AF 値を求め、基準高度を 300m としてホバリングを行い CD 値を求めている。UAV モニタリングでは、高さ 30m における AF 値と CD 値を求めている。Figure 2.5 から高さ 300m における予測値は実測値に対し概ね比例し、FSM による予測値が真値に対して誤差が少ないことを表している。対して高さ 30m の UAV では予測値が $0.15\mu\text{Sv/h}$ に集約した結果となっており、FSM がうまく適用できていないことが見てとれる。

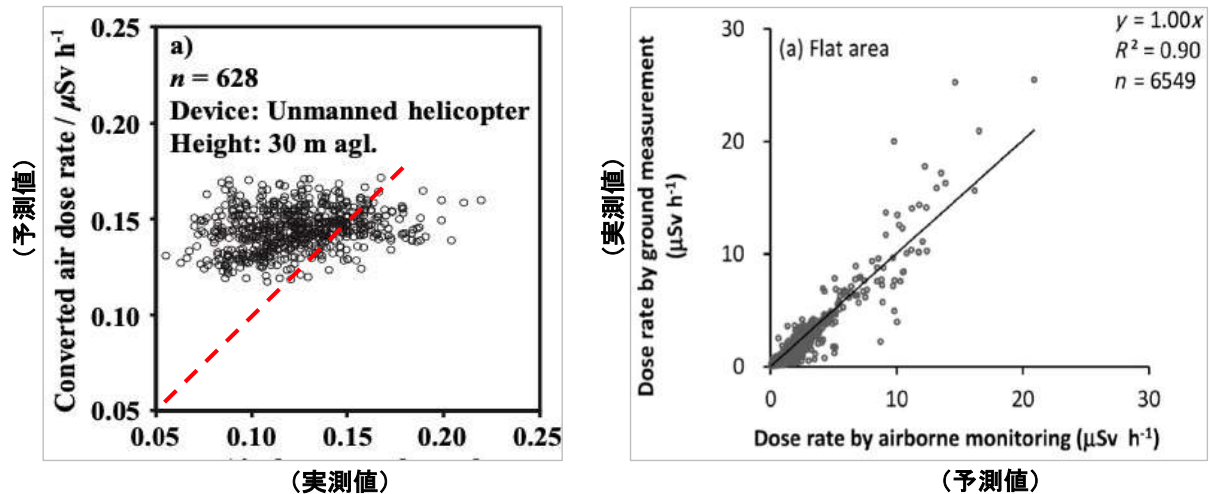


Figure 2.5 地上放射線量率の実測値と地上からの高さ30mの測定結果から求めた予測値(出典 [3])と高さ300mの測定結果から求めた予測値(出典 [11])

そのため、低高度 UAV センシングで推定を行う場合、測定した高さで放射線量率のデータだけでなく他のパラメータを考慮する必要があると考える。

また、従来手法ではデータの欠損している欠損セルに対して逆距離荷重法 (IDW : Inverse Distance Weighted) による補間を用いて欠損を補っているが、低高度 UAV センシングにおいては適さないと考えられる。従来研究では飛行高度が十分に高く、地表面の放射線源を十分に均一な分布と仮定できるため、補間対象のセルからの逆距離を用いた加重平均によって求める IDW で補間できる。一方、低高度 UAV センシングでは、放射線量率の局所的な勾配の変化や土地被覆の種類など、地形の影響が大きいため IDW による補間対象の欠損値だけでなく、欠損のない測定箇所の直下にあたる地上放射線量率もまた周囲の放射線源の影響を受けて実測値と推定値の間に差が生じる。そのため低高度 UAV センシングでは、推定を行うために測定データを十分に収集し、多く活用することが誤差を減らすことに寄与すると考えられる。

2.4 ANN を用いて地上放射線量率の機械学習を行う方法

前節で紹介した基本モデルとしての FSM は広域の航空機モニタリングにより効果を発揮する一方、低高度の UAV でモニタリングする場合には地形の影響が顕著に現れる。これに対し、地表の地盤の高さを表す数値標高モデル (DEM) と建物や樹木などを含む数値表層モデル (DSM) から得られる建物や植生の高さに関する地形効果の情報を基に機械学習で地上放射線量率を予測する UAV センシングのアプローチがあ

から実際の地上放射線量率の値へ換算可能にしている。最終的に換算値としての出力値を得るときは、目的変数である地上放射線量率の単位にするために、目的変数と出力層から得られる 0 から 1 の値で相関をとり、変換を行うことで出力値を得る。

(3) 隠れ層の追加

上記ステップの学習において出力値と目的変数の r の改善が見られなくなったとき、1 つの隠れ層が追加される。隠れ層はいくつか候補が作成され、それまでに作られたネットワークの出力値と目的変数の誤差と、相関が最大になるように重み値、バイアス値が選定されたものが追加される。全ての隠れ層の活性化関数は、式に示す \tanh 関数としている。この研究では、ANN を用いて上空の測定値を地上放射線量率に換算できるかどうか判断するために、 \tanh 関数を使用している。 \tanh 関数で得られる値の範囲は-1 から+1 であり、微分値の最大値は 1 である。シグモイド関数の微分値の最大値は 0.25 であり、 \tanh 関数はシグモイド関数に比べ勾配が大きいという利点があるため、この従来研究では採用されている。

(4) 再学習

隠れ層を追加した後の学習を再開する。このとき隠れ層と入力層の間の重み値とバイアス値は固定されており更新されない。 r が改善されなくなったとき、1 つの隠れ層が再度追加される。隠れ層を追加しても、 r が改善されなかった場合、隠れ層の追加は停止され、学習は終了としている。改善は r の値が 0.001 以上の上昇が見られなかったとき、改善がなくなるとみなす。

検証手段として、歩行計測で測定した地上 1m の放射線量率を目的変数とし、ANN を用いた予測値で比較検証している。Table2.1 は従来研究で使用された機械学習モデルの入力変数と目的変数である。本研究ではこの表の入力変数や目的変数を参考に ANN のモデルを再現し、上空における放射線測定値を地上放射線量率に換算した結果の適用及び評価を行った。

Table 2.1 学習に使用した入力変数と目的変数

入力変数	データ	単位
P1	測定対地高度	m
P2	50 - 450 keV 間の計数率 (散乱線)	cps
P3	450 - 900 keV 間の計数率 (直接線)	cps
P4	900 - 1400 keV 間の計数率 (U、Th 系列の天然放射線)	cps
P5	1400 - 2800 keV 間の計数率 (K40、U、Th 系列の天然放射線)	cps
P6	測定ポイントにおける DSM と DEM の差 (推定樹高：DSM-DEM)	m
P7-9	測定ポイントにおける 上空から撮影したエリア写真の色情報 (RGB 値：0~255)	-
目的変数		
T1	地上 1 m 空間線量率測定値	$\mu\text{Sv h}^{-1}$

構築された ANN について、各特徴量の重要度を比べたとき、DSM や RGB 値のそれぞれは、計測器の高さ（測定対地高度）と比べると小さく、予測精度は測定対地高度や ^{137}Cs 由来の γ 線の計数率に強く依存することがわかっている。従来研究では、Figure 2.7 のように、学習に使用した入力変数の貢献度評価を行い、各入力変数が ANN の換算においてどの程度の影響力があるかを評価している。

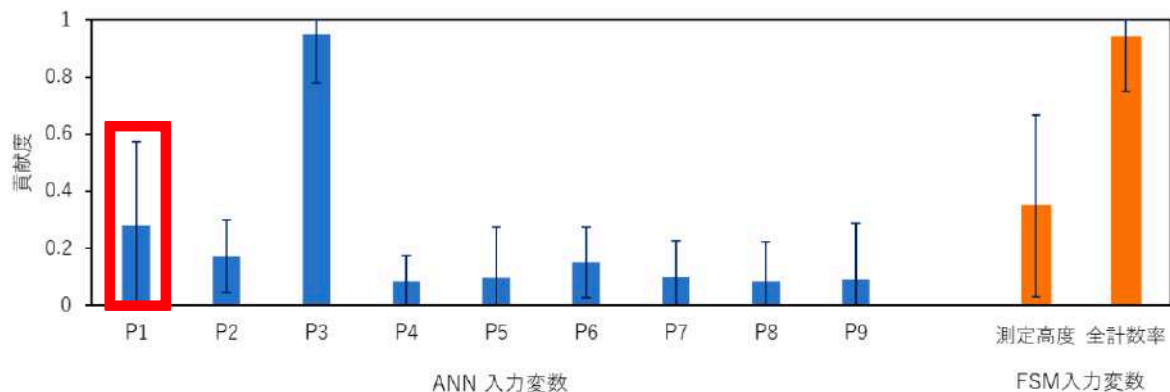


Figure 2.7 各入力変数の貢献度(出典 [14])

Figure 2.7を確認すると貢献度が最も高いのはP3（放射性セシウムの直接線の影響を受ける領域の計数率）で次いでP1（測定対地高度）が高いことが確認できる。Figure 2.7 右の FSM 入力変数は、FSM の換算結果における測定対地高度及び全数率計測の貢献度を表しており、ANN の P3 と P1 の貢献度と近い結果であることがうかがえる。また、この結果は高さ 100m 以上のデータを多く用いた結果であることから、この結果を用いた推定では、測定対地高度と測定した放射線量率に比重が置かれており、それ以外のデータの比重は軽いと考えられる。しかし、低高度 UAV センシングにおいては、地表面の不均一な放射線源による影響が大きいため、上記 2 つ以外の変数の重要度も高くなる可能性があり、さらなる考察が必要である。

さらに、ANN では、低高度 UAV センシングでの推定も可能としているが、従来研究において高さ 100m 以上で測定したデータを主に用いて推定を行っているため、適用可能であるか不明である点を残している。本研究では ANN の手法を従来研究の 1 つとし、本研究で提案する手法の有用性を示すとともに ANN の適用性についても考察する。

2.5 地表付近の空間放射線量率の減衰率特性に関する課題

前節で述べた従来手法（FSM, ANN）は、高さ 100m 以上の測定値を主に用いて検証を行った研究であり、低高度 UAV センシングの測定値を用いて詳しく検討されていない。以下、低高度 UAV センシングの測定値から地上放射線量率を推定する場合の問題点を整理し、本研究における課題を明らかにする。

FSM は、地表面を一様な放射線源と仮定し、地上から 300m 程度の高さで航空機による空間の放射線量率の測定値を用いて、地上放射線量率を数百メートル区画単位で推定する。しかし、低高度 UAV センシングの測定値を用いて推定する場合は、地上の起伏や土地被覆の種類等を要因とする地表面の不均一な放射線源の影響があり、推定値は実測値から大きく乖離する問題が指摘されている。地表付近では高さ 100m 以上の上空と違い地表に分布する放射線源の影響を局所的に大きく受け、上空の減衰率特性と異なる可能性がある。

もう一つの従来手法である ANN は、地上の起伏や土地被覆の種類等の地形情報を考慮することで高い推定精度を目指す機械学習モデルであり、頻繁に高度が変化する UAV による測定値に対しても有用であることが報告されている。しかし、これまでは、高さ 100m 以上で実施された航空機モニタリングの測定データに基づく地上放射線量率の推定が行われているのみであり、低高度 UAV センシングの測定値に対する推定は行われていない。ANN の研究においては、高さ 100m 以上のデータの推定での貢献度が測定した高さで放射線量率を高い重要度の特微量として扱っている。しかし、低高度 UAV センシングで学習を行った場合に測定した高さで放射線量率以外の別の特微量（例えば推定点から測定中の UAV までの直線距離）も距離減衰率に影響を与えることから貢献度が高い可能性がある。

また、低高度 UAV センシングは数メートル区画単位の解像度で放射線量率を測定する必要があるため、UAV の飛行経路に揺らぎや測定点数の不足により、地上放射線量率に対する推定値と実測値の誤差が拡大する空乏領域 [19] が出現する問題も指摘されている。

以上から、低高度 UAV センシングの測定値から地上放射線量率を推定する場合、(1) 地表面の放射線量率の不均一性の考慮と、(2) 空乏領域の影響の低減は地上放射線量の新たな手法を検討するための課題として重要である。

以降、第 3 章にて上記課題 (1) 及び (2) を解決するための提案手法を導入し、第 4 章にて上記課題 (2) に関して空乏領域の分布に着目し、推定領域の実環境への適用性を評価し、提案手法の有効性を明らかにする。

2.6 まとめ

本章では、地上放射線量率の推定における従来研究の説明と問題提起を行った。従来の推定手法は高さ 50m 以上の推定を前提条件としており、高度が十分に高い推定において重要となるパラメータは、上空で測定した高さで放射線量率が計算上重要な

役割を持つ。低高度 UAV センシングでは地表付近の減衰率特性が上空の減衰率特性と異なるため、低高度における放射線量率の調査を行い、地上放射線量の推定を行うために考慮する必要がある。

以降、本研究では従来手法としての FSM と ANN、提案手法の比較を行い、本研究で挙げた課題、すなわち、地表面の放射線量率の不均一性の考慮と空乏領域の影響の低減について、段階的に実験を行い、提案手法の有効性を検証する。本研究では、地上放射線量の新たな手法を検討するための課題を解決するために次章で提案手法を導入し、その有効性について詳しく議論する。

3. 地表付近の減衰率特性を考慮した放射線量率マッピング

3.1 はじめに

本章では低高度 UAV センシングを用いて地上放射線量率を推定する方法として、地表面の放射線量率の不均一性を考慮し、かつ空乏領域の影響を低減するための新たな地上放射線量率の推定法を提案する。

最初に、地表面付近の放射線量率の空間分布に着眼して放射線源からの距離と放射線減衰率の観測実験を行い、その結果を考察し、従来手法の段階的な拡張を試みる。従来手法の FSM は一般性が高く、今現在でも使用されている手法であることから、本研究では低高度 UAV センシングで必要となるパラメータを新たに考慮する。

提案手法 [20]では、直線距離で推定値の加重平均を求め、その後に垂直成分と水平成分の両方を合わせた距離補正を表す $f(h)$ を用いて i 番目の測定点の値 s_i から j 番目の推定点の値を求める。UAV センシングで測定を行った結果から学習領域を定めて最小二乗法で垂直成分と水平成分の距離補正を行い、その結果から地上放射線量率へマッピングを行うアプローチをとる。

3.2 放射線源からの距離と放射線減衰率の観測実験

低高度 UAV センシングにおける測定データには特徴があると考え、放射線源からの距離と放射線減衰率の関係、および、放射線源と地上放射線量率分布の関係を把握するために、平地に設置したコバルト 60 の放射性同位体からの鉛直方向と水平方向それぞれの放射線量率を UAV センシングを用いて実測した。以下2つの実験を行う。

(1) 鉛直方向の放射線減衰率に関する観測実験

平面なグラウンドに放射線同位体を設置し、上空から放射線同位体付近まで垂直降下を行い空間放射線量率を比較する。

(2) 水平方向の放射線減衰率に関する観測実験

放射性同位体を設置した箇所を起点の水平 0m 地点とし、高さ 1m, 15m, 50m のそれぞれの高さで、Figure 3.1 の水平 40m 地点まで平行移動して空間放射線量率を比較する。

以上2種類の測定データは Figure 3.2 に示される飛行経路で測定される。この結果に基づいて、以降、低高度 UAV センシングにおける放射線減衰率の分析を行う。



Figure 3.1 構内グラウンドの測定場所

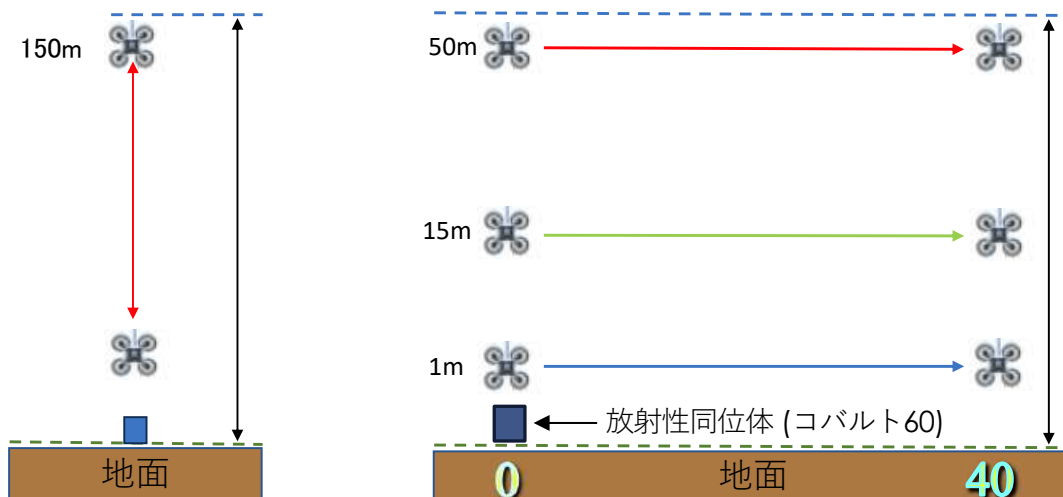


Figure 3.2 測定内容 (左:垂直降下, 右:平行移動)

3.2.1 鉛直方向の放射線減衰率

IAEA のガイドラインおよびそれに関連する研究報告 [17] [21]では、航空機の基準高度に測定結果を補正するために、指数関数的減衰による近似は、山間地域を除く無限平面の平地において高さ 50m から 250m で十分な精度が見込めることが確認されており、高さ 50m 以下は適用対象外である。仮に、無限平面の様な放射線源を仮定せずに指数関数的減衰を表す近似式を高さ 50m 以下にそのまま適用しようとする、近似値と実測値の間では差が生じる。

Figure 3.3 は、実際に大学構内のグラウンドにて平面の地表に放射性同位体を設置し、設置箇所の上空から UAV を垂直降下した結果をプロットしたものである。Figure 3.3 中の波線は、放射線量における理想的な減衰率を表した近似曲線を表し、IAEA のガイドラインで示されている通りに 50m 以上の高さでは近似曲線に則した分布となることが確認できる一方、50m 以下で空間放射線量率はこの近似曲線から離れ、放射線減衰率が高さに応じて異なることによる影響を確認できる。実際に 50m 前後から低い高さの放射線減衰率は単純な指数関数的減衰ではなく、Figure 3.3 のように二重指数波形に近い分布が見られた [22]。これにより本実験では、高さ 50m 以下の低高度 UAV センシングでは放射線減衰率の特性について考慮する必要があることを明らかにした。

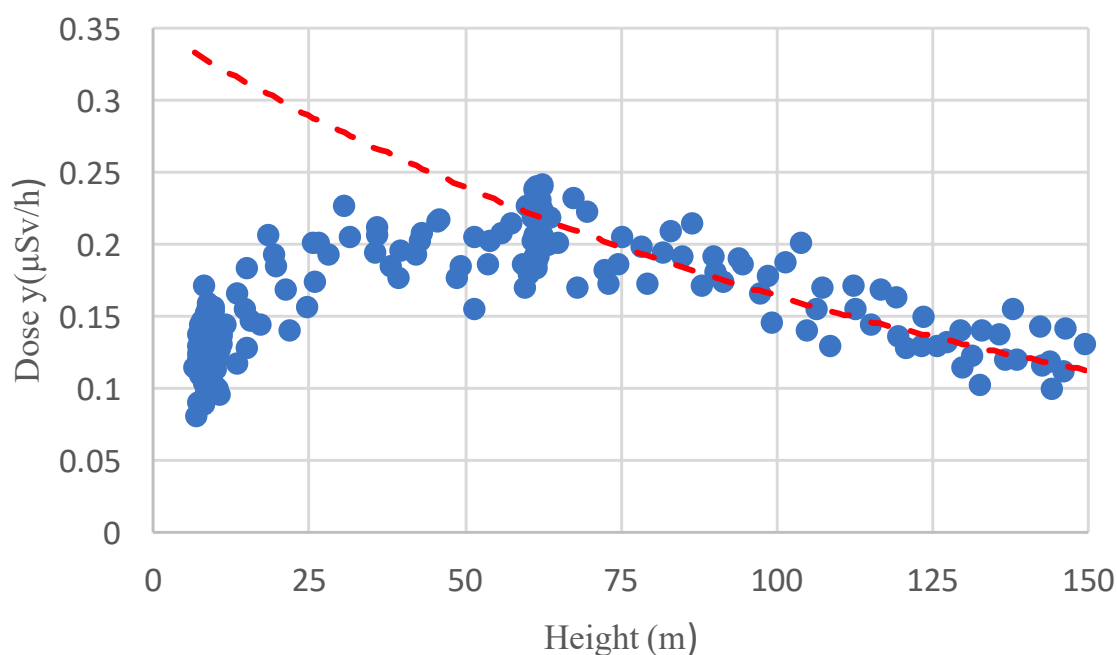


Figure 3.3 UAVを垂直降下させて測定した放射線量率

3.2.2 水平方向の放射線減衰率

高さ 50m 以下の UAV センシングにおいては、起伏のある箇所や土地被覆の差によって様々な角度から放射線が入射される影響を無視できなくなる。その影響は高さを下げるにつれて顕著であり、水平方向についても放射線減衰率を考慮すべきであることを確認した。

Figure 3.4 は大学構内のグラウンド内で放射線同位体を設置した箇所を起点の水平 0m 地点とし、一直線に移動して測定したときの放射線量率を表している。図中の①は歩行中の測定結果、②と③はそれぞれ高さ 15m と 50m で飛行した UAV の測定結果である。Figure 3.5 は、高度別におこなった本測定の断面図を表している。破線は、それぞれ簡易的な指数近似を表し、それらの近似式中の係数の絶対値は高さが上がるにつれて明確な減少（0.21 から 0.06 へ変化）を示した。

図中において実際に空間の放射線量率を比較すると、③の高さ 50m における測定結果は、水平 0m 地点では $0.06\mu\text{Sv/h}$ であった数値が水平 40m 地点では $0.04\mu\text{Sv/h}$ と 33% の変化であり、相対的に平坦であるのに対し、②の高さ 15m における測定結果は水平 0m 地点で $0.16\mu\text{Sv/h}$ であった測定値が水平 40m 地点で $0.07\mu\text{Sv/h}$ となり、56% の変化があり、57% の変化を示した①の歩行中の測定結果にかなり近い。このことから、地表面に近づくにつれて相対的に水平成分の影響による空間放射線量率の高低差が増大している。

補足として、森林地帯で低高度 UAV センシングの測定データを得ることは困難ではあるが、森林地帯で放射線量率の最大値が地表面ではなく樹冠の高さに位置する場合 [23] もあり、放射線源が不均一である。このことから、森林地帯を観測領域に加える場合、水平方向の放射線減衰率の変化を考慮する必要性が高いと考えられる。

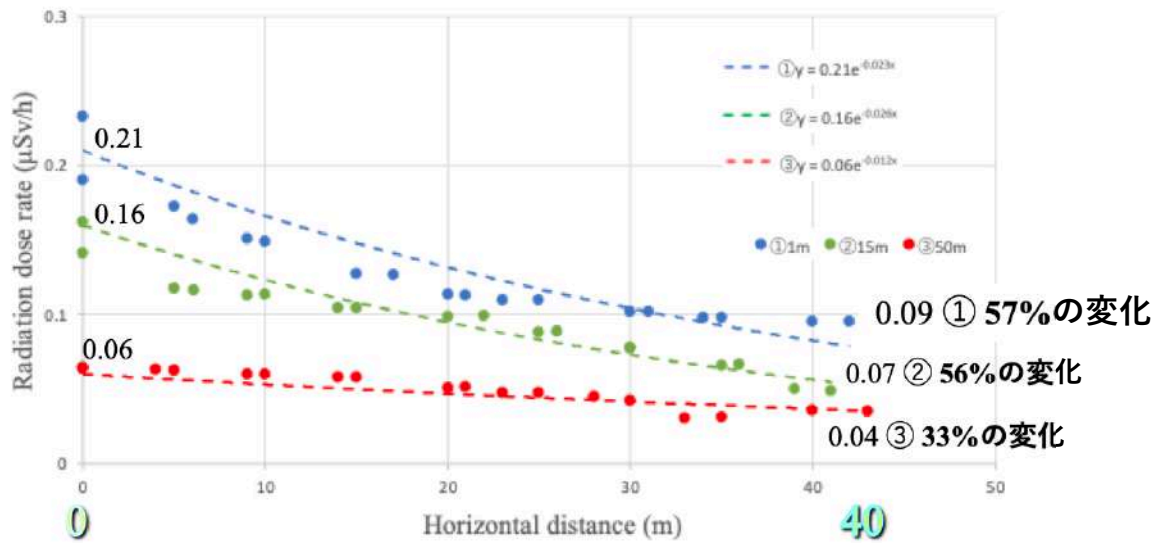


Figure 3.4 日大工学部グラウンドにおける高度別の近似曲線のグラフ

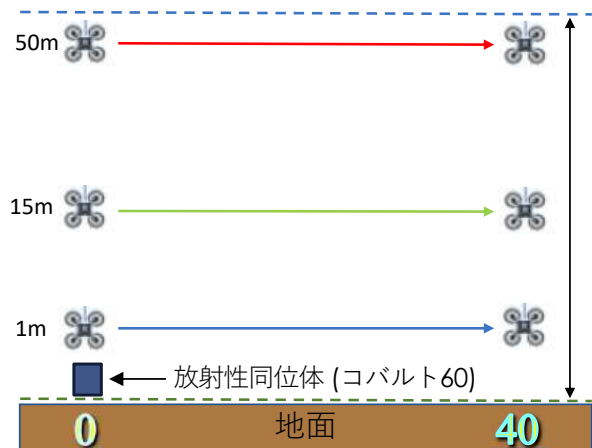


Figure 3.5 平行移動した箇所(左), 平行移動図(右)

3.2.3 低高度 UAV センシングにおける放射線源の影響

前節の実験において、高さ50mを境に測定した放射線量率が地表に近づくに連れて減少すること、および、高さが低くなるにつれて水平方向の放射線減衰率の変化があることを明らかにした。その結果に基づき本研究では、低高度UAVセンシングにおいて面線源ではなく点線源の影響も考慮する。

面線源は、面状にほぼ均一に放射線源が分布していると見做せる放射線源を指す。航空機モニタリングでは、高さが十分に高く、放射線量率マップの解像度も低いため地表を一様に平面として捉えることができ、線源が均一になり面線源として捉えるこ

とができる。しかし、低高度UAVセンシングでは、高さに対して地表の起伏や土地被覆の種類などの影響が大きく、かつ、測定範囲が狭まるため放射線量率が局所的に高い箇所（ホットスポット）の影響を無視することができないため、一様に平面と捉えられず、点線源として捉える必要がある。

また、点線源としての影響だけでなく、低高度でUAVセンシングを行うことから、線源視野の狭さも関わっていると考えられる。線源視野とは、空間線量率を測定する際の有効な領域 [24]を指しており、本研究における線源視野は空間線量率を調べるための放射線測定結果から推定を行う有効範囲である。Figure 3.6は、高さ100m以上の測定での線源視野と低高度UAVセンシングにおける線源視野を理解するためのイメージである。相対的に高い位置から測定した場合、Figure 3.6（左）のように、比較的大きな面積について放射線量率を均一化する。低高度UAVセンシングの場合、Figure 3.6（右）のように、地表面に近づき線源視野は狭まる。視野が狭まることから放射線測定機器が検出する γ 線の光子の総量も少なくなるため、放射線源の影響は相対的に大きくなる。また、ホットスポットのように放射線量率の急な勾配が存在するとその影響は無視できなくなる。

以上の考察に基づき本研究では、低高度UAVセンシングでは放射線源を点線源として捉え、鉛直方向と水平方向それぞれに分けて放射線減衰率の変化を考慮する。

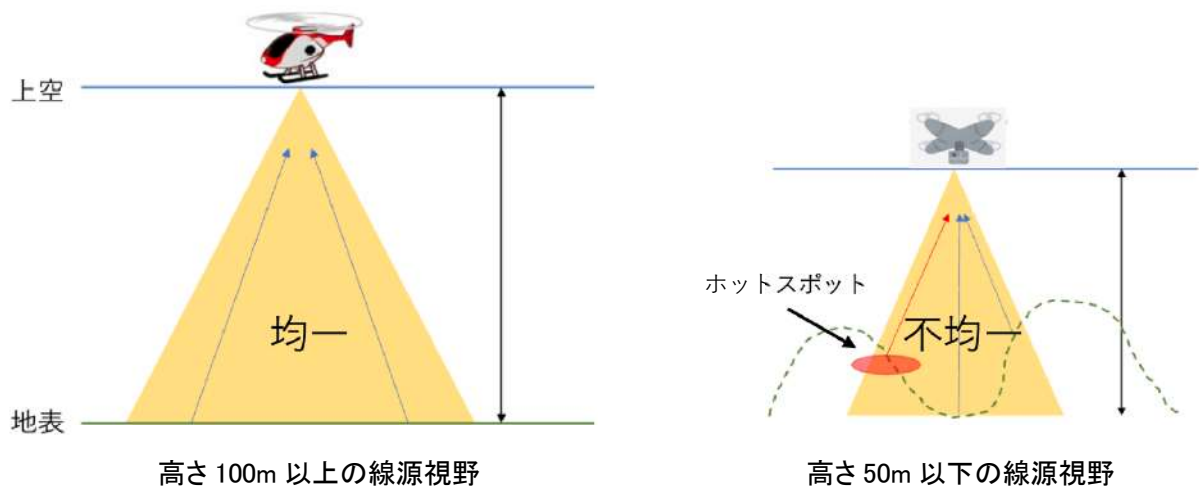


Figure 3.6 低高度UAVセンシングにおいて線源視野が狭まるイメージ

3.2.4 加重平均化を行う提案手法の考え方

従来手法のFSMでは推定に直上の点に対して高さによる補正を行い、その換算係数を用いることで地上放射線量率へ換算している。この直上点は、推定点に対する近傍

点であり放射線量率推定においては近傍点を用いて推定を行うことが推定精度の向上につながっている。Figure 3.7は、それぞれの高さで測定を行った場合の推定点からの距離を表した図である。例として、推定点から30mまでを近傍とする場合、Figure 3.7のように、直上の高さ30mの測定点だけでなく、高さ15mの周囲と1mの測定結果の周囲にも近傍の測定点が存在することになる。直上の高さ30mに測定点が存在せず高さ15mで推定点に最も近い測定点が存在する場合、FSMで推定する場合には、高度補正を行い、地上放射線量率を求めた後で、隣接する推定点の地上放射線量率を補間するため、この時点で水平成分の放射線減衰率の情報は失われ、誤差要因につながる。

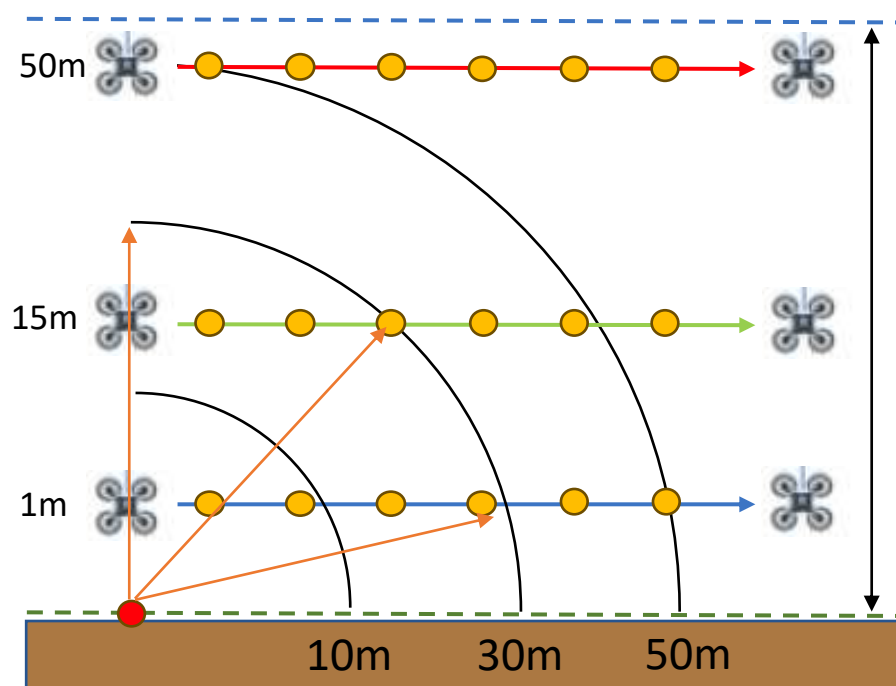


Figure 3.7 推定点から測定点までの直線距離を表した図

Figure 3.8は、FSMにおける推定点からの影響と実際の放射線源からの影響を表した図である。従来のFSMは、推定を行う点の直上の点の換算係数を決定し換算を行っているが、実際推定点の線源は図のように多くの測定点に影響を与えている。Table 3.1は、Figure 3.8における放射線の換算例の表である。Figure 3.8の推定点(赤点)の直上点を用いてFSMで換算した場合、高さ50mでは $0.14\mu\text{Sv/h}$ 、15mでは $0.27\mu\text{Sv/h}$ と15mの方が真値に近い換算結果となった。次に、FSMの換算結果を高度毎に平均化した場合50mで $0.12\mu\text{Sv/h}$ 、15mでは $0.26\mu\text{Sv/h}$ とこちらも推定点に近い点を用いたほうが真値に

近い換算結果となった。そのため、1点のみではなく、多くの点の影響度を考慮し換算した結果を平均化することは推定精度の向上につながる。

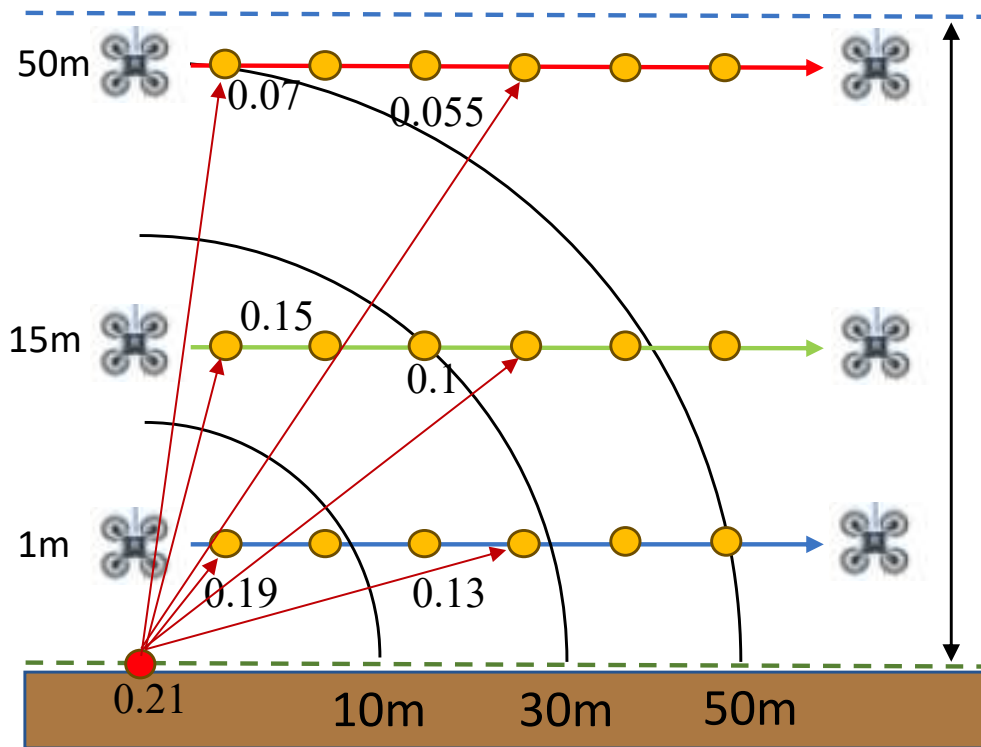


Figure 3.8 放射線源からの影響を表した図

Table 3.1 放射線量換算例 (μSv/h)

	50mの測定値から	15mの測定値から
FSMで換算	0.14	0.27
平均化後	0.12	0.26

また、推定を行う場合できるだけ地表に近い測定データを用いることは推定結果の向上につながるが、Figure 3.9のように低高度でUAVを飛行させると家屋や樹木などの障害物が存在し十分なデータを取ることができない場合がある。高さ50mの測定結果は、障害物が少ないため推定を行うためのサンプルデータのサイズは大きいですが、できる限り地表に近い測定結果の方が推定精度を向上させる。そのため、本研究では高度別のデータを複合し、加重平均することで精度を向上するアプローチをとる。すな

わち，推定点に近い近傍の測定結果から求めた推定値に重みを与えることで推定点に近い測定結果による推定値を優先し，推定精度の改善を求める．

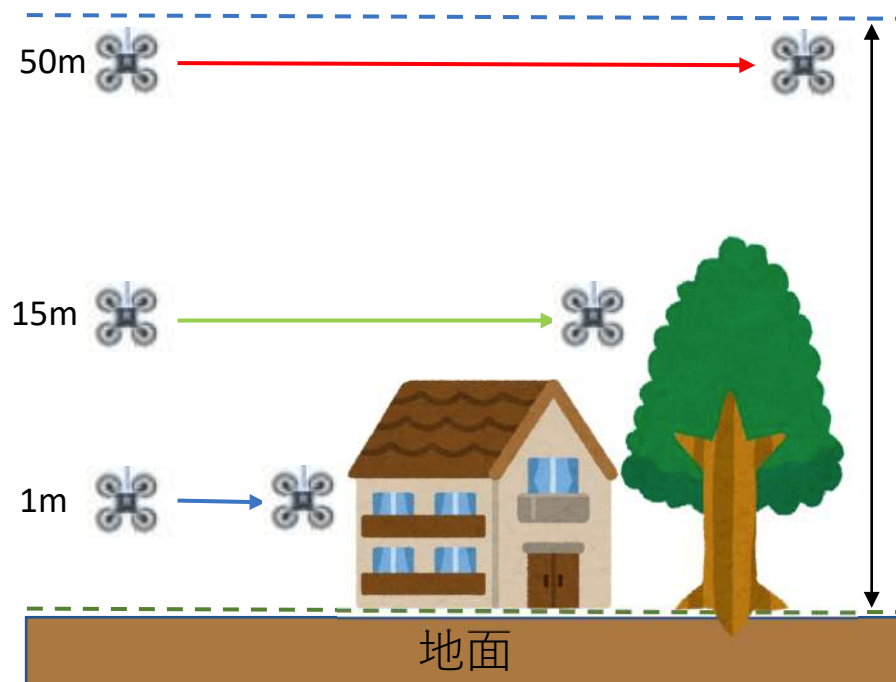


Figure 3.9 UAVセンシングにおける障害物

以上より，高さ50mを超過する全ての空間から得た放射線減衰率を用いた推定値には実測値からの差が大きい結果も含まれるため，高さ50m以下の低高度UAVセンシングで測定対象とする空間の放射線減衰率を使用し，かつ，推定点に近い測定値から推定した値を優先して加重平均することが誤差を低減するために有効であると考えられる．

本研究の提案手法では，地表に比較的近い放射線量率の空間分布に着眼して，従来手法の段階的な拡張を試みる．提案手法では直線距離と加重平均を用いる式を定義し，その後に，垂直成分と水平成分を合わせた距離補正を表す関数 $f(h)$ を用いて推定値を求める．このとき現地の学習領域を定め，その測定結果から即時に最小二乗法で垂直成分と水平成分の距離補正を行うことを自動化し，その結果から地上放射線量率へマッピングを行う．

3.3 前処理: 測定データの直交座標系への変換

本手法の前処理として、取得した緯度経度座標をガウス・クリューゲル図法で平面直角座標系 [25]に座標変換する。

最初に、3軸ともに同じ単位系に揃えてグリッドデータとして扱うため、UAV測定データの領域内から緯度経度の最小値と最大値を選んで推定領域を決定し、緯度経度を国土地理院が採用するガウス・クリューゲル図法で平面直角座標系に座標変換することによって3軸の尺度をメートル単位に合わせる。経度方向と緯度方向にセルを等間隔に並べた空間を推定領域とする。各セルのサイズはGPSの位置精度とUAVの測線間隔によって最小値が異なる点を除いて任意である。本稿の実験では測定間隔と測線間隔に基づき5mとしている。各セルの中心点に位置する地表の推定点の値を推定値 u_j とする。推定領域の地表の各点は平面と限らず、標高モデルを用いてZ軸の値も入力されたグリッドデータとして初期化される。

3.4 提案手法

Step1: 直線距離を用いた推定値の加重平均化

最初に、従来手法で使用する h_{std} を推定値の高さ1mにして、垂直方向の高さ h ではなく、推定点から検索半径 r 内にある測定点までの直線距離 d を使用して換算した結果を加重平均化する。Figure 3.10はそのときの概念図を表している。測定点を完全な直上と限らず最近傍にある測定点で推定した場合の精度変化を確かめる。最初に、 i 番目の測定点の値 s_i から直線距離 d_{ij} で j 番目の推定点の放射線量率に換算するための補正率 w_{ij} を式(3.1)としておりFigure 3.11はそのときの概念図を表している。このとき i 番目の測定点は推定点から検索半径 r 内にある測定点に限られる。式(3.2)において補正率 w_{ij} を用いて測定点の値 s_i を平均化し、推定点の放射線量率 u_j を得る。

$$w_{ij} = e^{-AF \cdot (d_{ij} - h_{std})} = e^{-AF \cdot (d_{ij} - 1)} \quad (3.1)$$

$$u_j = \frac{1}{CD} \cdot \frac{\sum_{i=0}^N w_{ij} \cdot s_i}{\sum_{i=0}^N w_{ij}} \quad (3.2)$$

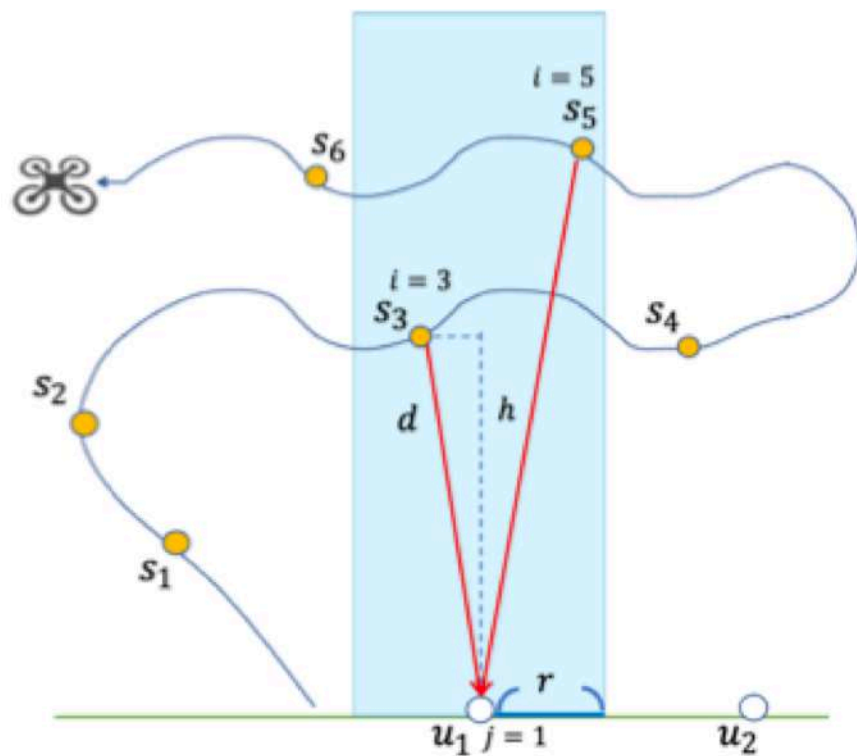


Figure 3.10 提案手法 (Step1) の概念モデル

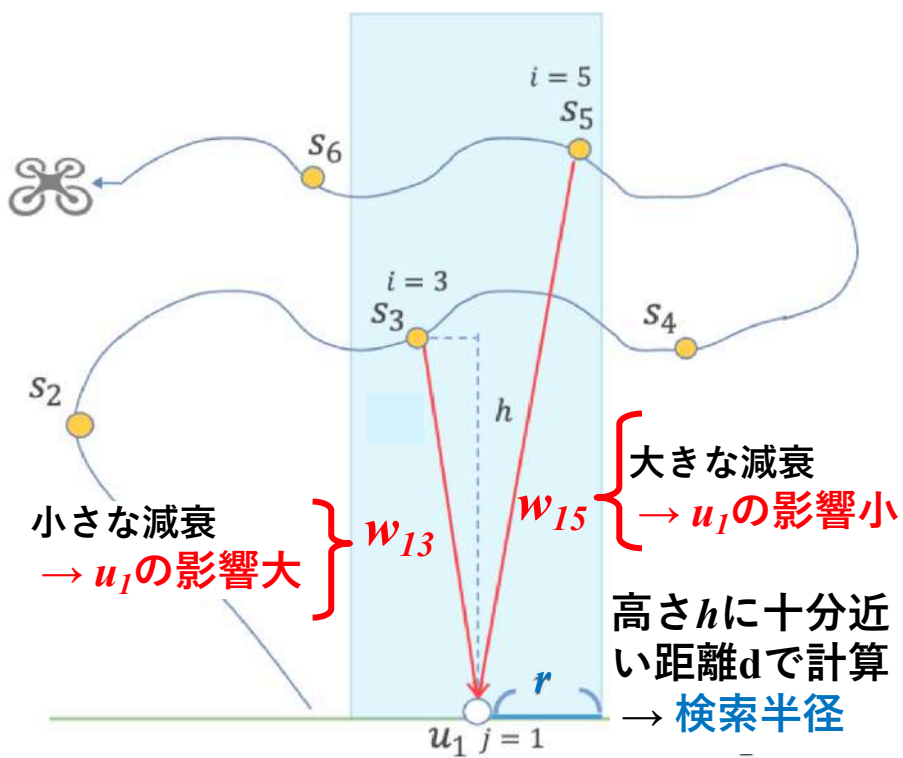


Figure 3.11 提案手法 (Step1) で加重平均に用いる重み w_{ij} のイメージ

Step2: 垂直成分と水平成分の距離補正

(1) 距離補正

i 番目の測定点から j 番目の推定点の距離 d_{ij} を垂直成分 dv_{ij} と水平成分 dh_{ij} に分けて補正率を表す f_{ij} を式 (3.3) に追加し, それを用いて新たな推定値 u_j を得る.

$$f_{ij} = \frac{e^{-\mu_v \cdot dv_{ij}} + e^{-\mu_h \cdot dh_{ij}}}{e^{-\mu_v \cdot 0} + e^{-\mu_h \cdot 0}} \quad (3.3)$$

$$u_j = \frac{1}{CD} \cdot \frac{\sum_{i=0}^N w_{ij} \cdot f_{ij} \cdot s_i}{\sum_{i=0}^N w_{ij} \cdot f_{ij}} \quad (3.4)$$

上式では, 補正係数 μ_v と μ_h を新たに導入しており, Figure 3.12はそのときの概念図を表している [20]. μ_v と μ_h は距離の垂直成分 dv_{ij} と水平成分 dh_{ij} それぞれの影響の強さが異なる距離補正を表す. 推定点そのものに十分近いとき1に近づき, 離れるほど0に近づく. 補正率を表す f_{ij} は, ビルドアップ係数 [26]に相当する概念であり, 複数の放射線源からの放射線減衰率を考慮する. ビルドアップ係数の考え方と本提案手法との関係を巻末の付録にて説明する.

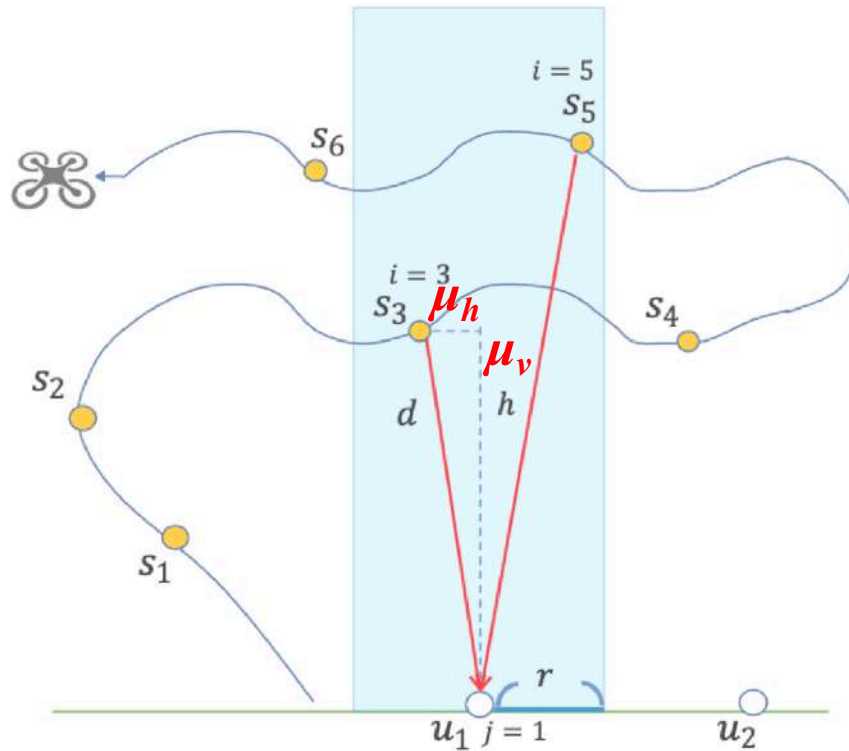


Figure 3.12 提案手法 (Step2) の概念モデル

(2) 補正係数の最適化

未知の観測領域では、地形効果により補正係数 μ_v や μ_h が変わりうるため、観測範囲内の学習用の観測領域（学習領域）でその都度キャリブレーションする必要があり、UAV測定データの観測値から最小二乗法でフィッティングする。すなわち、地上放射線量率の実測値を y_k としたとき、それに対応する k 番目の推定値を \hat{y}_k として、 $L = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - y_k)^2$ を最小化する AF 値、 CD 値、 μ_v 値、 μ_h 値を決定する。

学習領域を定めて放射線マッピング前に、おもに CD 値、 μ_v 値、 μ_h 値の再計算を行う。 AF 値は比較的変動が少ないため、再計算不要であることが多い。

3.5 実験

3.5.1 実験目的と概要

本実験は、従来手法との比較を行いつつ、地表に近い測定データ（1m から 50m）を含めた場合の推定精度や誤差要因を求めることを目的とする。提案手法と従来手法の結果を求めた後に、提案手法で推定精度を高める場合の測定データの高さや周辺土地の特徴について考察する。提案手法と従来手法の比較にはRMSE（平均二乗平方根誤差）を用いて比較を行う。詳しく提案手法との違いや特徴を考察するために、従来

手法を2つ採用した。最初に、従来手法1として2.3節で紹介した基本モデル(FSM)を用いた。次に、従来手法2として2.4節で紹介したANNをpythonコードで実装し、検証した。2.4節で紹介した先行研究では、DSMに基づく建物や植生の高さに加え、カメラ画像のRGB値を使用していた一方で、森林地帯の分析を主とする本研究では、代わりに森林、裸地(平地)、道路からなる土地被覆分類のマップを使用した[27]。

3.5.2 観測場所

本研究では、2019年6月に福島県第一原子力発電所から10km以内の森林に囲まれた箇所にて観測を実施し、以下の測定データを採取した。観測場所は森林に囲まれた住宅であり、中央に50m²以上の平面に近い裸地が広がる地形である。

3.5.3 使用した計測機器

本実験で用いる放射線検出器は、CsI(Tl)シンチレータとMPPC(multi-pixel photon counter)から構成される高感度放射線検出器(浜松ホトニクス製、C12137-01)であり、モジュール内でG(E)関数[28]を用いてγ線の放射線量率に変換している。また、観測領域中では¹³⁷Csが壊変するときの662keVと32keV付近にエネルギーをもつγ線が主であることを確認している。

3.5.4 歩行計測による地表の測定データ

歩行計測時の測定データは、平均0.5m/secで歩行計測を実施し、1秒あたり1点のサンプリングで測量した結果である。地表からの高さを1m(±10cm以内)で裸地や森林を歩行した結果を使用する。Figure 3.13は、本実験における実験を行った箇所と歩行計測による測定点の領域を表す。UAVのフライト中を含めおよそ3時間の歩行計測を行った結果、地表の測定点は10,186点記録された。図中のA(青色の枠)は従来手法と提案手法のパラメータフィッティングに用いる代表領域、B(赤色の破線枠)は比較検証用の推定領域を表す。

3.5.5 UAV計測による測定データ

今回得られたUAV計測時の測定データは、上記の歩行計測と同じモデルの検出器を搭載し、測線間隔を5m以内に維持して9フライト(1フライト10分前後、速度5m/s、1秒あたり1点のサンプリング)を実施した結果である。Figure 3.14のように、建物前の砂利面から離陸した後に地表からの高さ20mと50mで絨毯飛行を実施した。

図の飛行軌跡上の各測定点は、次節のパラメータフィッティングの結果に使用する散布図の測定点と対応する。Figure 3.13 の領域 A と B の上空の測定結果となる測定データの有効測定点は 8,515 点であった。

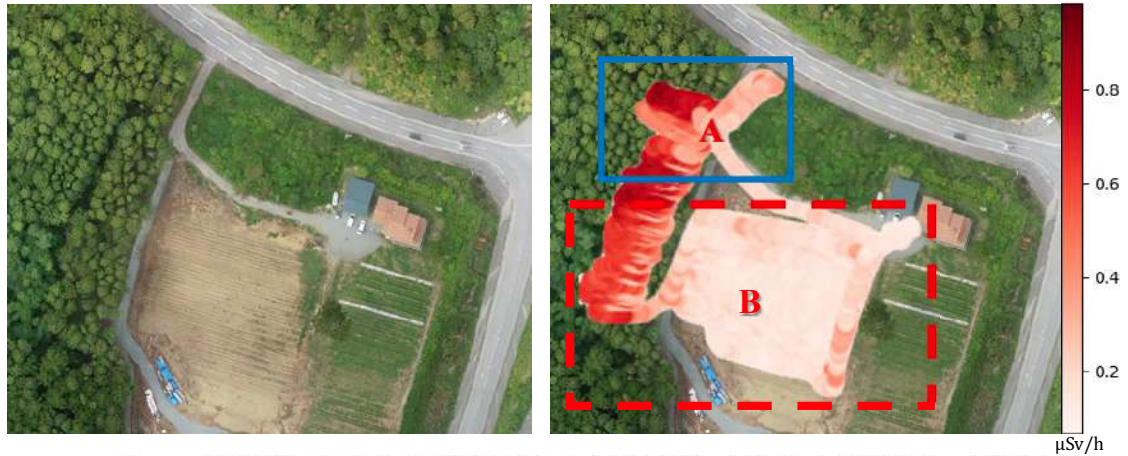


Figure 3.13 観測地の地形(左)と歩行計測による地上真値データ(右)
A: パラメータフィッティングのためのサンプリング領域, B: マッピングのための推計領域

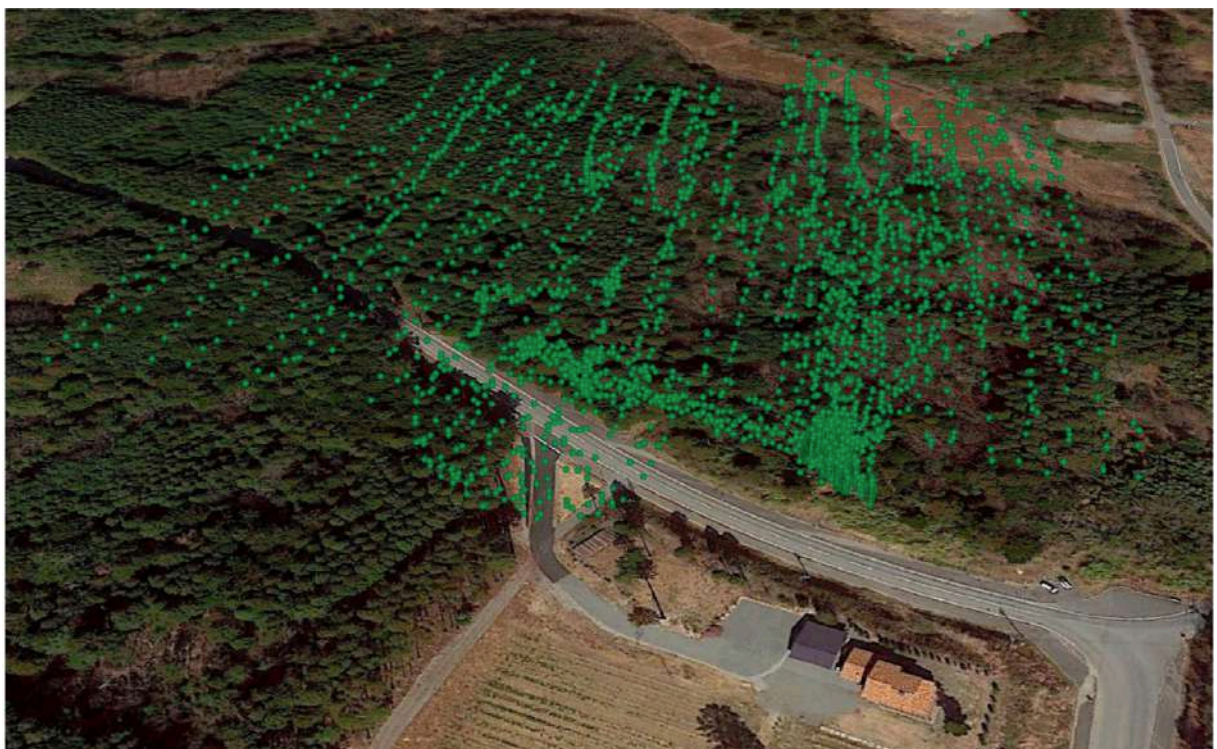


Figure 3.14 UAV計測時の飛行軌跡上の測定点(緑色)

3.5.6 パラメータフィッティング

本実験では、Figure 3.13の領域Aについて上昇下降運動を含む計9フライトのUAV計測による測定データと直下の座標に対応する歩行計測による測定値を使用した。従来手法と提案手法に使用するパラメータ (Table 3.2) を以下説明する。

Table 3.2 使用パラメータ

FSM	<i>AF</i>		<i>CD</i>		
	-0.0072		0.576		
ANN	Inputs	5 variables: <i>Flight height, Dose rate, Landcover rates within 20m radius (Forest, Bare, Road)</i>			
	Network	<ul style="list-style-type: none"> • Feedforward network with 2 hidden layers (64 × 32 nodes) • Batch Normalization, Dropout (20%) • Activation: RELU, Optimizer: ADAM 			
Proposed method	<i>CD</i>	<i>AF</i>	μ_v	μ_h	<i>r</i>
	0.000985	0.018	0.12	0.025	50

最初に、従来手法1 (FSM) に使用するAF値は参考文献のカタログ値(1), 2)に基づき、一方のCD値は地上1mの平均測定値 (0.33 μ Sv/h, N=3,396) と高さ50mから60mの平均測定値 (0.19 μ Sv/h, N=475) に基づいて計算された比 (0.19 / 0.33) である。

次に、従来手法2 (ANN) に使用するパラメータは参考文献に基づく。ただし、手に入る学習データの種類と規模や実行環境の違いがある。最初に、学習データについて、本研究では領域A内で座標一致する歩行計測の測定値とUAV計測の測定値の組 (N=113) を選択している。その学習データは、UAVの高さ、空間の放射線量率、そして半径20m内の土地被覆率 (Forest, Bare ground, Road) の5項目を説明変数とし、地上放射線量率を出力としている。次に、ネットワーク構造は、Tensorflow2.10の環境で構成され、今回の学習データでは隠れ層2層 (1層目64ノード, 2層目32) のときに最も安定して最善の平均二乗誤差に収束した。

最後に、提案手法 (Proposed method) に使用するパラメータを求める際、非線形最小二乗問題を解く手法として標準的なLevenberg-Marquardt 法のアルゴリズムを用いた。提案手法では領域A内で座標一致する歩行計測の測定値とUAV計測の測定値の組 (N=113) から各パラメータを最小二乗法で以下の順に明らかにして計算した。最初に提案手法1で必要となるCD値とAF値を求め、次に、提案手法2で必要となる μ_v 値と μ_h 値を求めた。計算に使用する検索半径*r*を標準の高さと概ね等倍となるように50mとした。

3.5.7 推定結果

(1) 裸地と森林の推定結果

Table 3.3 は、従来の FSM と ANN と提案手法を裸地と森林の領域の分けて推定を行った結果である。地上放射線量率の推定を行う対象領域は、裸地で 70 箇所、森林で 94 箇所の推定点からなる。推定誤差を比較した結果、従来の FSM と比較して提案手法の RMSE 改善率は森林で 33% ($0.132\mu\text{Sv/h} \rightarrow 0.088\mu\text{Sv/h}$)、裸地で 17% ($0.128\mu\text{Sv/h} \rightarrow 0.106\mu\text{Sv/h}$)の改善が見られた。RMSE 改善率について、比較結果では裸地に比べ森林の RMSE 改善率が大きい結果となった。すなわち、森林は比較的放射線量率の高い領域であり、実測値のバラつきが大きいことから、提案手法によって誤差が大きく改善されたが、裸地は相対的に放射線量率の低い領域で占められる、見かけ上の改善率は低い。

従来の FSM と比較して、提案手法 Step2 (垂直成分と水平成分の距離補正) の RMSE 改善率は森林で 36% ($0.132\mu\text{Sv/h} \rightarrow 0.083\mu\text{Sv/h}$)、裸地で 50% ($0.128\mu\text{Sv/h} \rightarrow 0.064\mu\text{Sv/h}$)の改善が見られた。ANN と比較した場合は、森林はほぼ同値、裸地で 37% ($0.103\mu\text{Sv/h} \rightarrow 0.064\mu\text{Sv/h}$)の改善が見られた。提案手法 Step1 (直線距離を用いた線量率換算結果の平均化) と比較した場合は、森林は 6% ($0.088\mu\text{Sv/h} \rightarrow 0.083\mu\text{Sv/h}$)、裸地で 39% ($0.106\mu\text{Sv/h} \rightarrow 0.064\mu\text{Sv/h}$)の改善が見られた。本結果は従来手法や提案手法 Step1 (直線距離を用いた線量率換算結果の平均化) と比較して裸地領域における RMSE の改善が大きく改善した結果となった。すなわち、裸地領域において垂直成分と水平成分の補正の効果がみられた。補足として、実験対象の裸地領域は平面かつ障害物になるような建物なども存在しなかったため、水平成分による距離補正が推定結果の向上につながった。一方、森林領域で提案手法の Step1 と Step2 の間で比較的改善していない理由として、森林領域においては水平成分以外に推定に影響を与える成分がある可能性と、森林を推定する際に使用するデータは森林上空を飛行した高さ 50m の一定高度のデータしか使用できない事情があり、できるだけ地表に近い UAV 計測による測定データが得られなかったことが影響している。

Table 3.3 RMSE による推定領域の推定精度 ($\mu\text{Sv/h}$)

推定領域 (N: 推定点数)	FSM	ANN	提案手法 (Step1 のみ)	提案手法
裸地 (N=70)	0.128	0.103	0.106	0.064
森林 (N=94)	0.132	0.084	0.088	0.083

(2) 全データを用いた推定結果

Table 3.4 は、高さ 50m のみの測定データを用いて推定を行った結果と、上空の有効点すべてを用いて推定を行い比較した結果である。従来の FSM は一定高度のみのデータを用いて推定を行う手法のため、従来のデータの使用方法と本研究で提案した UAV で測定した全データ（可変高度）を使用する方法で推定結果に影響があるのか比較を行い考察する。比較を行う領域は森林と裸地を複合した全領域とする。従来手法としての FSM と比較して、提案手法 Step1（直線距離を用いた線量率換算結果の平均化）の一定高度のみの測定データを使用した場合の RMSE 改善率は 26% (0.150 → 0.111) ，可変高度の測定データを使用した結果の改善率は 27% (0.130 → 0.095) となった。Table 3.4 から提案手法で可変高度の測定データを用いた推定が最も改善した結果となった。すなわち、可変高度のデータを用いたことで地表にできるだけ近い測定データで推定を行うことができた結果、大きな改善を得ることにつながったといえる。

提案手法と従来手法である FSM と ANN を、高さ 50m のみの測定データを用いて推定を行った結果と、上空の有効点すべてを用いて推定を行異比較した結果である。従来の FSM と比較して、提案手法 Step2（垂直成分と水平成分の距離補正）の改善率は一定高度のみの測定データを使用した場合で 49% (0.150 → 0.076) ，可変高度の測定データを使用したで 42% (0.130 → 0.075) の改善が見られた。ANN と比較した場合は、一定高度のみの測定データは 16% (0.091 → 0.076) ，可変高度の測定データで 18% (0.092 → 0.075) の改善が見られた。提案手法 Step1（直線距離を用いた線量率換算結果の平均化）と比較した場合は、一定高度のみの測定データは 31% (0.111 → 0.076) ，可変高度の測定データで 21% (0.095 → 0.075) の改善となった。実験結果から、どの測定データを用いた場合でも垂直成分と水平成分の距離補正を加えた結果が最も改

善したことから、低高度 UAV センシングの推定においては垂直成分と水平成分の距離補正を考慮することは重要であることが明らかとなった。

Table 3.4 RMSE による推定領域の推定精度 (μSv/h)

UAV 計測時の測定データ	FSM	ANN	提案手法 (Step1 のみ)	提案手法
一定高度のみの測定データ (高さ 50m)	0.150	0.091	0.111	0.076
可変高度の測定データ (高さ 1m ~ 50m)	0.130	0.092	0.095	0.075

Figure 3.15 は、提案手法と従来の FSM の推定結果を森林と裸地（平地）の土地被覆別に色分けしてプロットした内容である。図中のプロットで丸いマーカは裸地、三角マーカは森林の結果をそれぞれ表す。土地被覆別の視点では相対的に高い放射線量率（0.5μSv/h 以上）の領域にある森林内または森林境界の推定結果が手法間で推定精度に大きく影響している。その中で提案手法は、地上放射線量率の実測値が低い領域と高い領域の両方でそれぞれ安定して推定値が実測値に近い傾向が特徴的である。

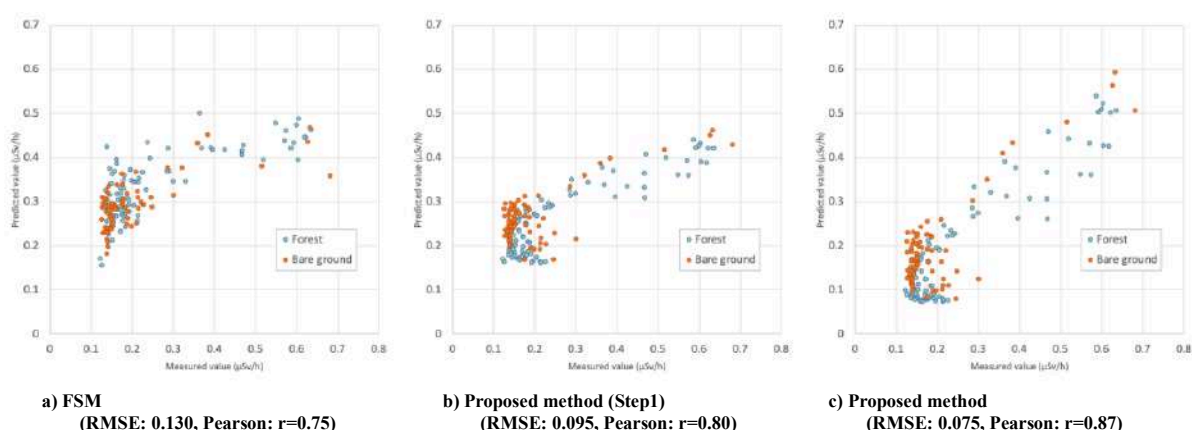


Figure 3.15 土地被覆別の推定結果の比較(裸地 :オレンジ N=70, 森林:シアン N= 94)

さらに、高さ 1m から 50m の UAV 計測時の測定データ（高さ 1m~50m）を使用し推定した結果を Figure 3.16 にプロットして FSM と提案手法の差を比較する。横軸

は歩行計測による地上 1m の測定値を表し、縦軸は FSM (図中の四角マーカー) , 提案手法 (Step1 のみ) と提案手法の推定値をそれぞれ表す。従来手法の FSM は裸地における推定結果が実測値と比較したとき大きく乖離していることが確認できる。これは従来の FSM では裸地領域での推定において上手く適用できない例を表している。提案手法 (Step1 のみ) は、FSM の結果と比べ、複数の測定点を用いて平均化した効果が見てとれる。それに対し、Step2 の結果を含む提案手法の推定値は Step1 で比較的残差の大きかった低線量領域の残差を主に減らしていることが確認できる。

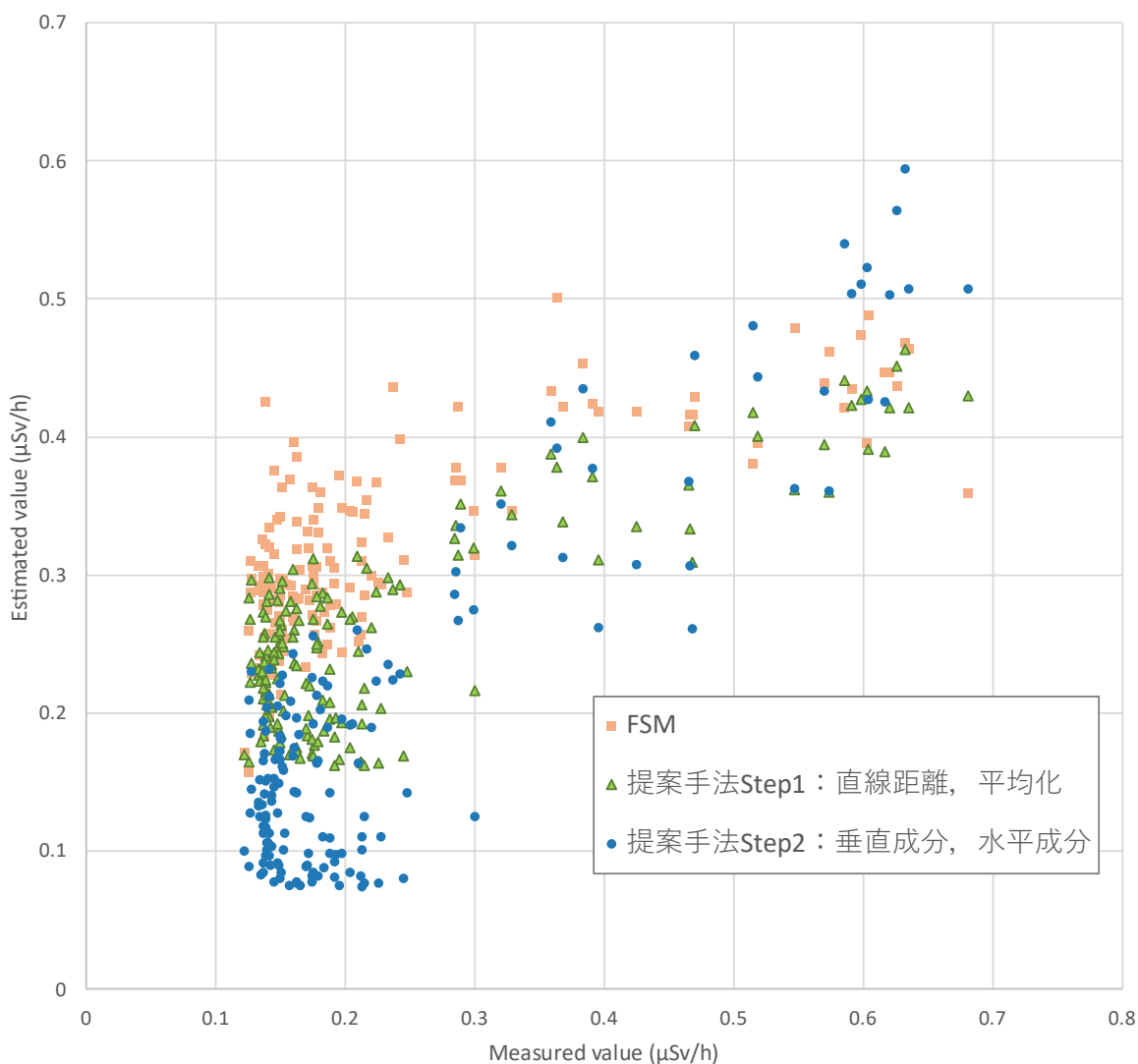


Figure 3.16 実測値と推定値 (FSM と提案手法)

3.5.8 マッピング結果

UAV 計測による測定データを使用して提案手法 (Step1) から推定された地上放射線量率のマッピング結果は, Figure 3.17 のように, 森林 (左側) を高線量領域 (淡い色 (明るい黄色)) とし, UAV 離着陸地点となった建物周辺 (右側) の砂利で舗装された地面を低線量領域 (濃い色 (暗い青色)) とする傾向が得られた. 本実験ではセルサイズ 5m で推定点が配置され, 各推定値を用いた等高線図がオーバーレイされた. このマップのカラーコードは相対的な高線量領域を明るい黄色, 中線量領域を赤色, 相対的な低線量領域を青色とし, 除染対象として注意すべき箇所 (黄色, 赤色) を示している.



Figure 3.17 提案手法 (Step1) のマッピング結果
(Table 3.3 の「0m 以上」において, 0.6 μ Sv/h 以上を黄色,
0.4 μ Sv/h 以上を赤色, 0.2 μ Sv/h 以下を青色で表示)

3.5.9 考察

最初に, 本実験で従来手法の FSM と提案手法の推定精度を比較したとき, 森林地帯や除染済みの箇所を含む裸地領域のいずれでも RMSE 改善を示したことは, ホットスポットと除染箇所の検出に役立つ可能性を示唆する. 参考文献¹⁴⁾においても, 森林地帯で車両計測と航空機モニタリングの推定結果を比較しており, 実測値と推定値

の散布図は本章の Figure 3.15 (a)と類似した分布を示していた。そのことから、測定環境の条件は参考文献 [3]のものにも十分近い可能性はある。

本提案手法で垂直成分と水平成分の距離補正を検討した。この距離補正が適する箇所とそうでない箇所について土地被覆を分けて今後検証を重ねる必要は考えられる。提案手法の減衰式は指数関数フィッティングが十分可能なものであれば、従来の原発事故直後の高線量領域も推定可能である可能性が高い。一方、地表付近で実際の散乱や反射の影響度合いを検証するためには、点減衰核積分法 [26][29][30]を用いて空気中や土壌中のビルドアップ係数を用いた高精度のシミュレーション結果と比較することも検討の価値がある。

従来手法と提案手法いずれにおいても、一定高度の測定データだけでなく様々な高度の測定データを用いて地上放射線量率の推定が可能であることを示唆したことは、学習データを増やし、効果的に推定精度を向上させうるともいえる。すなわち、歩行計測のみでなく複数の UAV を用いた同時観測をして、測定データをそのまま統合し、高い時間効率で高線量の局所領域を特定することにつながる。

次に、従来手法の ANN と提案手法を比較したとき、提案手法の Step1 のみと Step2 を含めた結果で段階的に RMSE 改善を示したことは、すなわち直線距離や水平距離も重要な特徴量である可能性が高いことを表す。また、これらの特徴量は垂直距離や水平距離の組み合わせから抽出可能な 2 次データであることから、ANN のような機械学習モデルで有用である可能性が高いことも示唆される。

今回の検証に用いた手法以外にも実用的なアプローチとして畳み込みニューラルネットワークをはじめとする深層学習の応用が考えられる。このアプローチでは検証精度を確実に向上させる点で有効である一方で、測定データを画像として学習する場合には、測定結果の膨大な画像枚数（概ね UAV フライト数に相当）が要求され、学習コストがかかる点が最初のネックとなる。原則的に UAV の測定データは特定の季節や日付、気候条件、対象地域が限定されるので、ロバスト性を考慮に入れて学習データを増やし、モデル化する必要がある。それだけでなく、複数の層を持った非線形モデルであることから、学習結果のモデルやパラメータ、推定結果の根拠について現場で正確に把握することも難しくなりやすいことが予想される。

3.6 まとめ

本章では、低高度 UAV センシングにおける課題を解決する直線距離を用いた線量率換算結果の平均化と垂直成分と水平成分の距離補正による新たな手法を提案した。実験では、従来手法の FSM と ANN と提案手法の比較を行い、放射線源が不均一に分布する森林と裸地を含む観測領域で検証を行った。提案手法の Step1（直線距離を用いた線量率換算結果の平均化）の推定結果から直線距離を用いた線量率換算結果の平均化は推定精度を向上させることを確認した。Step2 を含む提案手法全体の推定結果では、垂直成分と水平成分の距離補正を加えることで更に推定精度を向上させることを確認した。これらの結果から、直線距離を用いた線量率換算結果の平均化と垂直成分と水平成分の距離補正を行う本提案手法は、低高度 UAV センシングにおける推定精度の向上に有用であることを明らかにした。

4. 空乏領域検出法を用いた地上放射線量率の推定誤差の解析

4.1 はじめに

UAV センシングにおいてデータの収集を行う際に絨毯飛行を用いて収集を行う。しかし、効率的かつ欠損のないデータを収集するため丁寧に絨毯飛行を行ったとしても、測定結果が欠損する領域が残る可能性は常に存在する。

従来手法ではデータが欠損しているセルが存在する場合、自然近傍法 (Natural Neighbor) や逆距離加重法 (IDW), クリギング法 (Kriging) 等の内挿を用いて補間を行っている。しかし、高さ 50m 以下の低高度 UAV センシングでは地上放射線量率が不均一である影響を大きく受けるため、補間した際に大きな誤差が生じる可能性が大きい。そのため、上空の測定データを十分に収集して推定を行うか、欠損の存在するデータを用いても精度の高い推定を行う必要がある。

前章の提案手法の実験では、空間的に密な測定データ (9 フライト, 高さ 50m, 30m, 10m) を用いて推定を行っているが、欠損の多く存在するデータでは推定を行っていない。提案手法が欠損の存在するデータに対して適用可能かどうかは未知であった。

本章では、提案手法の適用性を低高度 UAV センシングによる測定で出現する空乏領域の分布に着目して評価し、空乏領域の比率が高いときの提案手法の効果を明らかにする。そのため、提案手法で地上放射線量率を推定するときにある推定点について測定点がどのくらい粗であると誤差に影響を及ぼし、その領域によって一定水準以上の許容誤差に到達するか否かを詳しく考察するため、「空乏領域」の概念を導入し、実験結果を分析する。

4.2 空乏領域判定法

UAV を観測で利用する際の飛行経路は経路の長さや幅が固定された一定の間隔で観測点を取得できることが理想的な放射線量率測定のための経路である。しかし、UAV を用いた観測では風や障害物の影響を受け、計画した経路から外れて観測してしまうことがしばしばあるため、観測領域内に観測点が少ない場合や、観測点が存在しない場

合がある。このとき，ある観測領域において近傍の観測点の密度が乏しい領域を空乏領域 (Figure 4.1) と定義する。



Figure 4.1 空乏領域

従来手法では，以下の3つの手順で空乏領域を判定 [4] [19]している。

- (1) メッシュ状に分割した領域の中で， k 番目の観測点が属するメッシュの座標を P_k とする。
- (2) P_k から検索半径 r 内に位置する観測点の数を計算する。
- (3) 検索半径 r 内の観測点数が規定に達しない場合， P_k を含む領域を空乏領域とする。

Figure 4.2 の場合， P_k の検索半径 r 内に観測点が5点存在しているため， P_k を含む領域は空乏領域と判断されない。

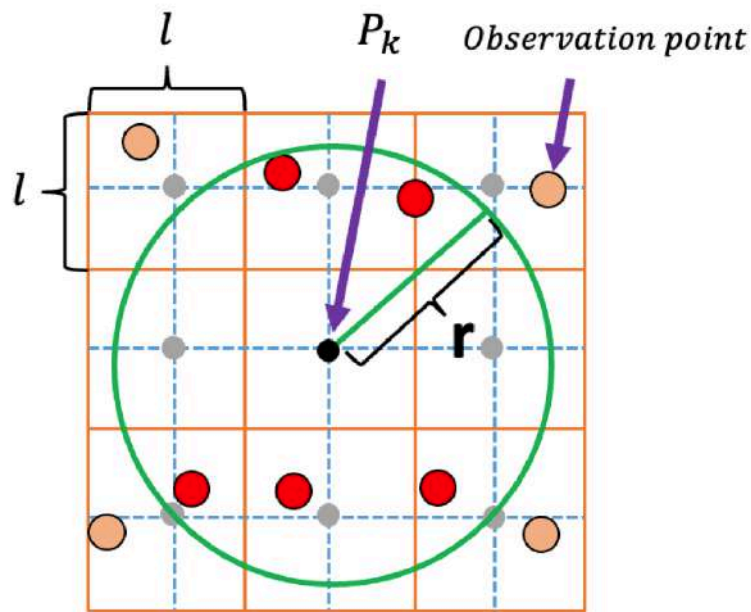


Figure 4.2 空乏領域判定

従来手法 [4]では、この検索半径内の観測点から地上の観測値を推定する。地上の観測値を推定するためには IDW をはじめとする補間法を用いる場合が多い。IDW は推定する地点と観測点の距離により距離の逆数の重みをつけ補間する。IDW では P_k のセル領域から検索半径 r 内の観測データを利用するため、検索半径内に一定数の観測点が存在している必要がある。検索半径 r について、検索半径 r は全てのセル領域で観測点を得られるように調整される必要がある。検索半径の決め方は任意であるが、目的とする地上分解能に応じて決定する必要がある。本研究で使用している放射線モニター (HSF-1) は 1 秒に 1 度のタイミングで測定値をサンプリングする。UAV の飛行速度を 5m/s に設定した場合、5m に一度測定値をサンプリングすることと同義である。このとき 1 辺が 5m 程度のセルとなる放射線量率マップを作成するために、飛行条件を設定する必要がある。本実験では、検索半径 r を UAV の飛行速度と測線間隔から決定した。

4.3 実験と結果

本実験では、前章で提案した手法が空乏領域が存在していても有用であるのかを確認するために、空乏領域の存在する測定データを用いて推定を行い従来の FSM と比較を行う。本実験では 2022 年 12 月に福島県双葉郡富岡町の福島第一原子力発電所の

被災地から 10km 圏内の森林に囲まれた裸地 (Figure 4.3) で行われた飛行実験のデータを使用する. 実験条件は Table 4.1 の通りである. 放射線検出器が 1 秒間隔で測定値をサンプリングすることに基づいて, 1 辺が 5m 程度のセルとなるように放射線量率マップを作成するための十分な UAV の飛行速度や測線間隔を設定した. UAV の飛行高度は 35m, 40m, 50m の 3 種類の高さである. 放射線量率推定のためにできるだけ推定点に近い近傍の測定点を得られる高さ 35m で測定するとき, Figure 4.3 の丸で囲った地点などには樹高の高い樹木の障害物により, 測定を上手く行うことができない箇所もあることから, 障害物を回避することが容易な高さの測定データも収集し, 複数の高度で測定を行っている. UAV の飛行速度は 5m/s, 測線間隔を 5m とした結果, 観測範囲内の UAV の有効点数は 167 点 (Figure 4.4) となった. 地上放射線量率の平均値は $0.209\mu\text{Sv/h}$, 最大値は $0.397\mu\text{Sv/h}$, 最小値は $0.140\mu\text{Sv/h}$ であった.



Figure 4.3 観測地点

Table 4.1 実験条件

領域サイズ	45m × 30m
飛行時の高さ	35m, 40m, 50m
飛行速度	5m/s
測線間隔	5m
有効点数	167
平均の地上放射線量率	0.209 μ Sv/h
地上放射線量率の最大値	0.397 μ Sv/h
地上放射線量率の最小値	0.140 μ Sv/h



Figure 4.4 観測範囲内における UAV 計測時の有効測定点

4.3.1 実験目的

本実験における目的は、本研究で提案した手法が空乏領域が存在する測定データにおいて適用可能であること、および、空乏領域の比率に関する提案手法の適用限界について分析を行うことにある。

本実験における測定データは、Figure 4.3 の観測地点について UAV を用いて絨毯飛行を行い測定した結果である。Figure 4.5 はフライトの飛行軌跡を表しており、Home は HomePoint（離着陸地点）を表している。上空の測定結果となる UAV 計測による測定データの有効測定点は 167 点であった。

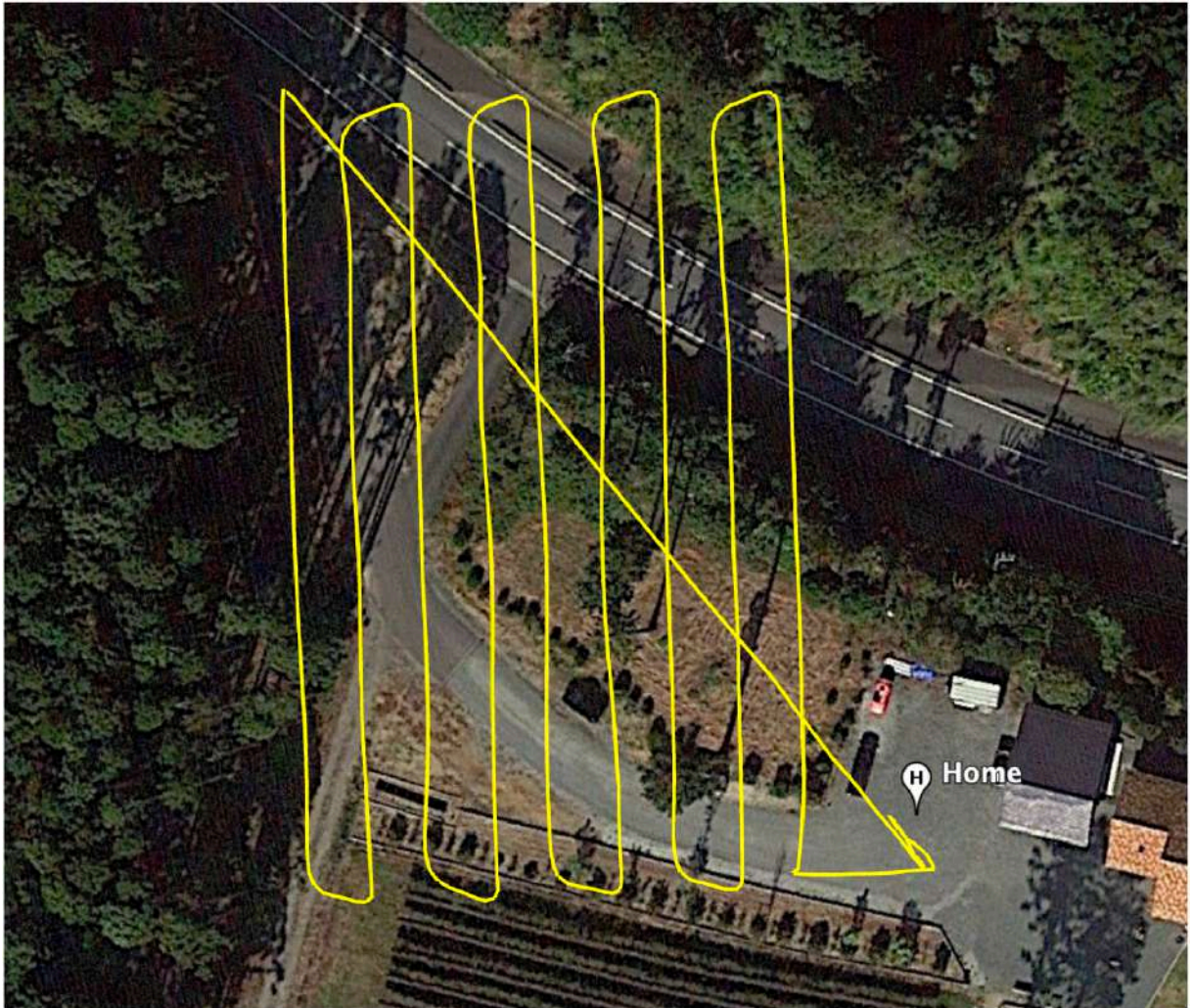


Figure 4.5 観測領域の飛行軌跡



Figure 4.6 観測領域の飛行軌跡(横図)

Table 4.2 は、本実験における使用データを表す。測定領域のセルサイズは一辺 5m で合計 54 セルとした。Data1 は測定領域上空の有効点数は 167 点の測定データであり空乏領域の比率は 0%としこのデータを基に人工的に空乏領域を発生させたデータ (Data2 から Data4) を作成した。空乏領域を発生させたデータは、Data1 に対してランダムサンプリングで選択された行を削除した後に、空乏領域検出法を用いて空乏領域検出を実施することで空乏領域の比率を確認した。

Table 4.2 空乏領域のおよその比率と推定結果の RMSE ($\mu\text{Sv/h}$)

	X 方向の長さ	Y 方向の長さ	測定領域セル数	空乏領域の比率
Data1 (N=167)	45m	30m	54	0%
Data2				20%
Data3				50%
Data4				70%

4.3.2 実験方法

実験方法として、UAV を用いて測定を行い測定データからランダムサンプリングを用いて人工的に空乏領域を作成し推定を 100 回試行し、推定結果の RMSE や標準偏差から分析を行う。ランダムサンプリングによって作成したデータは、空乏領域判定法を用いて空乏領域を可視化し空乏領域が作成されているか確認する。推定結果は Data1 の空乏領域 0%の結果を基準として 100 回推定した結果の平均値と標準偏差を用いて分析を行う。

測定地点では 167 の観測点が得られ、観測値の最高は $0.397\mu\text{Sv/h}$ であり、観測値の最低は $0.140\mu\text{Sv/h}$ であった。以下の Figure 4.7 から Figure 4.9 は観測地点において検索半径を 5m, に設定した条件下で空乏領域判定法を用いて可視化した空乏領域の例である。



Figure 4.7 空乏領域 20%の例



Figure 4.8 空乏領域 50%の例



Figure 4.9 空乏領域 70%の例

4.3.3 実験結果

(1) 推定結果と考察

Table 4.3 は、Table 4.2 で作成した空乏領域の存在する測定データを用いて提案手法で 100 回試行した推定結果の RMSE の平均と標準偏差を表したものである。空乏領域が 0%である Data1 の推定結果の RMSE は $0.059\mu\text{Sv/h}$ となり、この結果を基に空乏領域が存在する測定データの場合と比較を行った。Data2 における RMSE の平均は $0.062\mu\text{Sv/h}$ 、Data3 では $0.067\mu\text{Sv/h}$ 、Data4 では $0.067\mu\text{Sv/h}$ であることから、提案手法は空乏領域が多いデータにおいて推定結果の誤差が大きく拡大しないことが明らかとなった。

空乏領域の比率が高い測定データに対して推定誤差が大きく拡大しない理由として、提案手法が検索半径内で加重平均を用いて推定を行うことが挙げられる。FSM で計算する場合、推定点の直上に測定点が存在しない場合に推定を行うことができないが、提案手法は検索半径内に測定点が存在すれば推定を行うことが可能で加重平均によって上手く推定を行うことができたためと考えられる。

Table. 4.3 推定結果の RMSE 平均と標準偏差 ($\mu\text{Sv/h}$)

	RMSE の平均 \pm 標準偏差 (100 回試行)
Data1 (空乏 0%)	0.059
Data2 (空乏 20%)	0.062 ± 0.002
Data3 (空乏 50%)	0.067 ± 0.004
Data4 (空乏 70%)	0.067 ± 0.004

(2) 計算不可能な領域

今回の推定結果では 3 章の実験のように FSM との直接的な比較は行えない。すなわち、空乏領域が存在するデータを用いて推定を行う際に、その計算を行うことができない箇所が存在し、推定値の欠損する箇所が多数存在することにより比較対象として適さないものとなった。FSM を用いて計算することが不可能である理由として、推

定点の直上に測定点が存在しなかったためである。Table 4.4 は空乏領域の比率が 20% のデータを FSM を用いて推定を行った際の、推定結果の一部である。このデータでは Figure 4.10 の青枠内に空乏領域が存在しており、この空乏領域により推定点の直上に測定点が存在しないため計算不可能となった領域が多数生じた。

Table 4.4 FSM の推定結果 ($\mu\text{Sv/h}$, 一部のデータ)

推定点	x	y	実測値	推定結果
2	12.5	2.5	0.197	
10	12.5	7.5	0.173	0.284
18	12.5	12.5	0.163	
26	12.5	17.5	0.172	
34	12.5	22.5	0.256	
3	17.5	2.5	0.169	
11	17.5	7.5	0.170	0.308



Figure 4.10 FSM による計算が不可能な箇所 (青枠)

同様に、計算不可能な領域は提案手法の計算においても確認できる。Table 4.5 は空乏領域の比率が 50%のあるデータを用いた際の推定結果の一部を抽出したものであり、Figure 4.11 は Table 4.5 の推定を行えなかった箇所を青枠と赤点で表したものである。このときの青枠で囲った空乏領域のサイズは 9m×13m であり枠内の中心部に計算不可能な領域が存在している。

Table 4.5 計算不可能な箇所の推定結果

	x	y	v	推定結果
16	2.5	12.5	0.207	0.245
17	7.5	12.5	0.169	0.214
18	12.5	12.5	0.163	
19	17.5	12.5	0.195	
20	22.5	12.5	0.212	
21	27.5	12.5	0.160	0.173
22	32.5	12.5	0.194	0.182
23	37.5	12.5	0.172	0.198

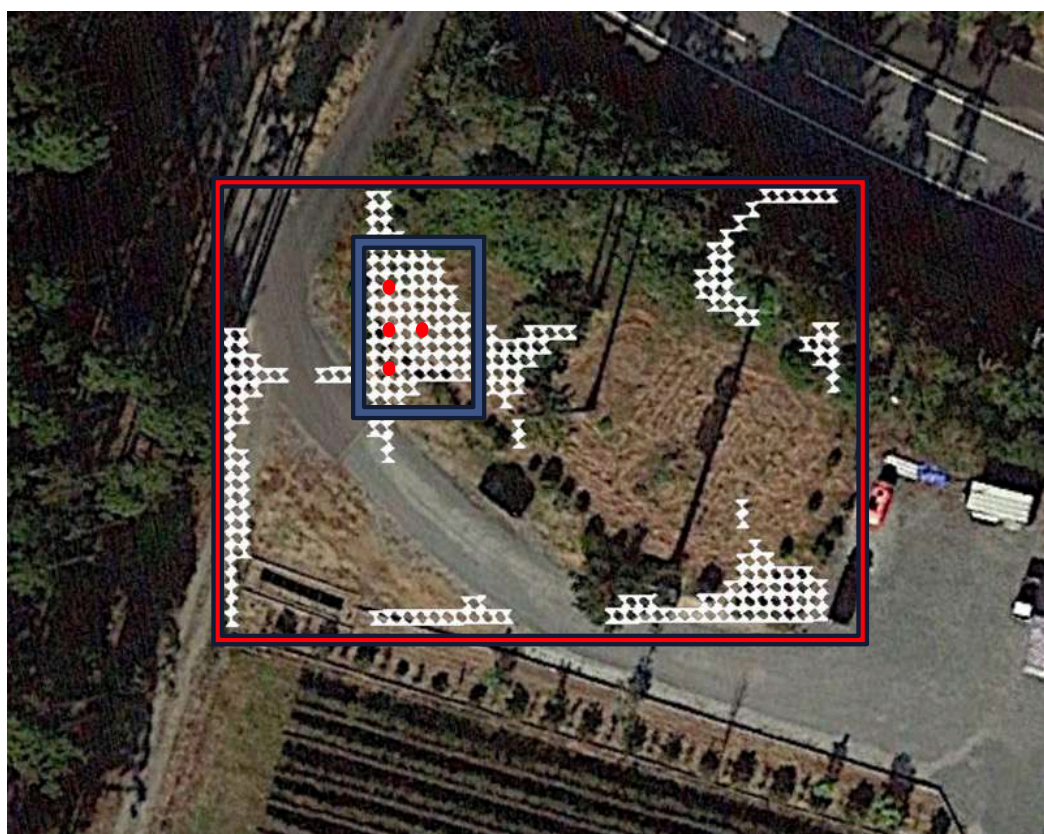


Figure 4.11 計算不可能な領域の例

Table 4.6 は Data2 から Data4 で推定をそれぞれ 100 回試行した結果，計算不可であった回数を表したものである．計算不可能回数は，推定が行えないセルが 1 セルでも存在している場合は計算不可能としてカウントしている．計算の結果，空乏領域が 20% のデータではすべてのデータで計算が行えなかったセルが存在せず，計算不可回数は 0 回だった．空乏領域の比率 50% と 70% のデータでは，計算不可能な箇所が出てきておりそれぞれの回数は 50% で 23 回，70% で 76 回計算を行えない結果となった．空乏領域を作成する場合は $\pm 5\%$ を許容範囲として作成している，空乏領域の比率 50% のときは 45% から 55% で作成しているが 50% の推定結果で，計算不可となった回数は 45% から 50% で 8 回，50% から 55% で 15 回となり空乏領域の比率が 50% を超えると増加する傾向が見られた．

Table 4.6 計算不可の回数

	空乏領域の比率	計算不可回数
Data2	20%	0
Data3	50%	23
Data4	70%	76

上記の Data3 で計算不可能であったセルを分析することにより，Figure 4.11 の青枠の領域のように空乏領域が局所的に密集していることを確認した．Figure 4.11 の空乏領域のサイズは 9m×13m で他の計算不可の場合の空乏領域も一辺が 10m を超えるサイズのとき中心部に計算が行えない箇所が存在していた．本研究では，このように推定値を得ることのできない空乏領域を計算不可能な空乏領域と捉える．

4.4 まとめ

本章では，提案手法の適用性を低高度 UAV センシングによる測定で出現する空乏領域の分布に着目して評価し，空乏領域の比率が高いときの提案手法の効果を明らかにした．

実験では空乏領域の比率が 50% を超える測定データにおいても，空乏領域の比率が 0% の測定データと比較して推定誤差が大きく拡大しないことを確認し，領域が存在するデータに対しても推定誤差が拡大しなかった理由として，空乏領域が存在する場

合においても検索半径を用いて範囲内の測定データから加重平均を用いて推定することに提案手法の有効性があることを明らかにした。

空乏領域の比率が 50%を超える場合において、推定のための計算不可能な領域が生じる。空乏領域が局所に集中することにより、推定点の検索半径内に測定点が存在しない領域が生まれたためである。本実験では検索半径を 5m に設定したため、空乏領域のサイズは一辺 10m を超える領域のときに計算不可能であることが多いことから、空乏領域の一辺の長さが検索半径の倍以上のときに計算不可能になると結論づけられる。本研究ではこのような領域を計算不可能な空乏領域と捉える。

以上から、提案手法は空乏領域に対して推定誤差が拡大しないため有効であることが分かった。その一方で、空乏領域の比率 50%の計算不可能な領域に関するデータの解析をしたとき、計算不可の回数が空乏領域の比率が 45%から 50%で 8 回、50%から 55%で 15 回と 50%を超えたときに回数が増加したことから、提案手法で推定を行うとき、空乏領域の比率は概ね 50%を限度とすべきであることも明らかとなった。

5. 結言

5.1 研究で得られた成果

本研究は、低高度 UAV センシングで利用可能な手法の提案を目的とし、低高度における放射線の特性から、直線距離を用いた線量率換算結果の平均化と垂直成分と水平成分の距離補正による FSM の拡張を提案した。実験では、従来手法の FSM と ANN と提案手法の比較を行うことで、それを表現できることを確認した。また、比較検証において土地被覆別の推定と高度別のデータを用いて推定を行った事によって、直線距離を用いた線量率換算結果の平均化と垂直成分と水平成分の距離補正は、推定結果の向上に有効であり、実用性が高いことを示した。

また、提案手法が空乏領域の存在するデータに対して有効であるか確認するために、人工的に空乏領域が存在するデータを作成し推定を行い分析を行った結果から、それを表現できることを確認した。また、推定結果から提案手法は空乏領域が多く存在するデータにおいても推定誤差を拡大しないことを示した。

低高度 UAV センシング及び放射線量率マッピングの分野における本研究の提案手法による貢献を以下3つ挙げる。

- (1) 低高度では高さ方向の補正だけではなく水平方向の減衰を考慮し補正することで推定精度の向上を得ることが可能であることを発見した。低高度 UAV センシングにおける測定では線量の不均一性が挙げられ、線量が均一であると仮定している高さ 100m 以上のデータと違い線源が独立していると考えられる点線源として捉えることで、線源毎の変化が存在することを明らかにし補正を加えることで推定精度の向上につなげることができた。
- (2) 地上放射線量率の推定に使用するパラメータの適用範囲内（UAV フライトで空間の放射線量率データを取得した観測の観測領域付近であること）の条件下で、一定高度のフライトの測定データだけでなく可変高度の測定データも追加することで効果的な推定精度の向上が得られることを明らかにした。既存の FSM では推定点の直上1点のみを推定に用いていたため測定点が存在しなかったり外れ値などによって推定誤差が拡大する可能性があるが、提案手法は検索半径を用い

て半径内全ての測定データを用いて推定を行うことで近傍点や多くの測定データによって推定誤差の拡大を防ぐことができた。

- (3) 検索半径を用いた推定法を用いたことで、空乏領域の多いデータを用いた推定においても推定誤差が拡大しない推定結果を得られることを明らかにした。既存のFSMによる推定は、推定点の直上の点のみで推定を行うため空乏領域の存在する測定データで推定を行うと、直上にデータの存在しない箇所ができてしまい推定を行えない。提案手法は検索半径を用いて半径内全ての測定データを用いて推定を行うため空乏領域が存在していても半径内にデータが存在すれば推定を行うことができる。ここでの推定結果から提案手法は空乏領域が多く存在するデータにおいても推定誤差が大きく拡大しないことを示した。ただし、空乏領域が50%のデータで推定を行った際に計算不可能な領域が存在しており、空乏領域が局所的に集中している箇所で確認された。本研究ではこのような領域を計算不可能な空乏領域と捉えた。計算不可能だった回数は空乏領域の比率が50%を超えるときに生じるため、現実的に提案手法で計算可能な空乏領域の比率の限界は概ね50%以下であることが分かった。

以上、本論文では、低高度 UAV センシングに適用する新たな地上放射線量率の推定方法を提案し、帰還困難区域付近等の実測値を用いて有効性を評価した。本研究成果は、UAV を用いて地上放射線量率マップを高精細かつ信頼性高く作成することに不可欠なものであり、今後の低高度 UAV センシング及び放射線量率マッピングの技術として寄与するものである。

5.2 今後に残された課題

今度の課題として以下が挙げられる.

- (1) 本研究の提案手法は, 距離に対する補正のみ評価している. 放射線の不均一性は, 地形や土地被覆の影響を大きく受けるため, 土地毎にデータを収集し特徴や傾向を分析することで土地毎の追加パラメータを検討する必要がある.
- (2) 第 3 章での垂直成分と水平成分を考慮した補正の実験において, 本実験で使用した水平方向の補正は全ての高さで一律の補正係数を用いている. 低高度 UAV センシングでは高さ毎に水平方向の影響は異なるため, 高さ毎の μ_h を考慮する必要がある, 高さ毎に μ_h を決定し計算を行う必要がある.

謝辞

本研究は，日本大学大学院情報工学専攻における研究として，日本大学工学部情報工学科の源田浩一教授と大山勝徳准教授の指導のもとに取り組むことができました．本研究のまとめに際して，源田浩一教授と大山勝徳准教授からの教示を頂きましたことを深く感謝申し上げます．また，株式会社ふたばの皆様からは，UAVを用いた実験の実施や分析結果の議論にあたり，貴重な助力をいただきました．ここに感謝の意を表します．最後に，日本大学大学院工学研究科情報工学専攻学生として研究室にて実験用のデータ収集等を通してお世話になった森田暁志様と松谷真志様に深く感謝いたします．

論文リスト

A. 基本論文

論文題目	公表の方法及び時期	著者	関連する章
可変高度の UAV センシングにおける森林地表付近の減衰率特性を考慮した放射線マッピング	計測自動制御学会論文集, Vol. 59, No. 6, 2023年6月, pp. 269-277	<u>鬼川 凌</u> 大山 勝徳 源田 浩一	3 章

B. 学会誌及びこれに準ずるもの

論文題目	公表の方法及び時期	著者	関連する章
Radiation mapping using a double exponential attenuation model for UAV sensing in forest area	Proceedings of 2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), July 2022, pp. 1012-1015	<u>Ryo Kikawa</u> Katsunori Oyama Kouichi Genda	3 章

C. 日本大学工学部紀要及びこれに準ずるもの

論文題目	公表の方法及び時期	著者	関連する章
Landcover Based 3-Dimensional Inverse Distance Weighting for Visualization of Radiation Dose	Proceedings of 2019 IEEE World Congress on Services (IEEE SERVICES), July 2019, pp. 370-371	<u>Ryo Kikawa</u> Katsunori Oyama Hua Ming	1 章
Void Area Detection for Efficient UAV Sensing in Radiation Dose Mapping	Proceedings of 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), October 2022, pp. 430-431	<u>Ryo Kikawa</u> Masashi Matsuya Katsunori Oyama Kouichi Genda	4 章

D. 学会の大会、支部大会などの口頭発表

論文題目	公表の方法及び時期	著者	関連する章
周辺土地の起伏量を考慮した3次元逆距離加重法による地上放射線量の推定	計測自動制御学会東北支部 第312回研究集会, 資料番号 312-4, 2017年2月	鬼川 凌 大山 勝徳 見越 大樹 西園 敏弘	1章
周辺土地の起伏量を考慮した3次元逆距離加重による地上放射線量の推定法の提案	第55回アイソトープ・放射線 研究発表会要旨集, 2018年7 月, p.53	鬼川 凌 大山 勝徳 見越 大樹 西園 敏弘	1章
3次元逆距離加重法を用いた地上放射線量の推定結果と周辺土地の起伏量の解析	計測自動制御学会東北支部 第319回研究集会, 資料番号 319-3, 2018年11月	鬼川 凌 大山 勝徳 見越 大樹 西園 敏弘	1章
放射線観測値ベクトルと減衰行列を用いた地上放射線量の推定	第62回日本大学工学部学術 研究報告会・情報工学部会, 資料番号 情-1-5, 2019年12 月, pp.12-15	鬼川 凌 大山 勝徳 西園 敏弘 見越 大樹	1章
観測値ベクトルと直行座標を用いた地上放射線量の推定	第63回日本大学工学部学術 研究報告会・情報工学部会, 資料番号 情-1-2, 2020年12 月, pp.3-7	鬼川 凌 大山 勝徳 西園 敏弘 見越 大樹	1章
UAV センシングによる3次元空間線量と減衰行列の重ね合わせを用いた放射線マッピング	令和3年度 情報処理学会東 北支部研究会, 資料番号 1-4, 2022年2月	鬼川 凌 大山 勝徳 西園 敏弘 源田 浩一	1章

論文題目	公表の方法及び時期	著者	関連する章
UAV センシングにおける 3 次元空間の減衰率特性を考慮した放射線マッピング	第65回日本大学工学部学術研究報告会・情報工学部会, 資料番号 情-3-20, 2022 年 12 月, pp.214-217	鬼川 凌 大山 勝徳 源田 浩一	3 章

参考文献

- [1] 師田 晃彦, “東日本大震災の影響から JAEA の航空機モニタリングにつなげる,” *福島の進路*, No.487, pp. 5-10, 2023.
- [2] 鳥居 健男, “空からの測定,” *RADIOISOTOPES*, 64, 12, pp. 775-782, 2015.
- [3] K. Ochi, M. Sasaki, M. Ishida , Y. Sanada, “Comparison of airborne and ground-based tools used for radiation measurement in the environment,” *Progress in Nuclear Science and Technology*, 6, pp. 103-107, 2019.
- [4] T. Morita, K. Oyama, T. Mikoshi , T. Nishizono, “Decision making support of UAV path planning for efficient sensing in radiation dose mapping,” *Proceedings of 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, pp. 333-338, 2018.
- [5] K. Oyama, H. Wakabayashi, A. Takeuchi , N. Ishitsuka, “Integration of 3D Trajectory Maps into a Local Distribution Map of Radiation Dose Using Unmanned Aerial Vehicle,” *Proceedings of IEEE Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW)*, pp. 607-612, 2012.
- [6] K. Oyama, K. Nakamura, H. Wakabayashi, A. Takeuchi , N. Ishitsuka, “Situational map integration of dose distribution on the ground surface using Unmanned Aerial Vehicles,” *Proceedings of 2013 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*, pp. 171-174, 2013.
- [7] R. Kikawa, K. Oyama , H. Ming, “Landcover Based 3-Dimensional Inverse Distance Weighting for Visualization of Radiation Dose,” *Proceedings of 2019 IEEE World Congress on Services (SERVICES)*, pp. 370-371, 2019.
- [8] 佐々木 美雪, “上空における放射線測定値の解析手法に関する研究,” 名古屋大学博士論文, 2021.

- [9] E. Druker, “Processing of Airborne Gamma-Ray Spectrometry using Inversions,” *ASEG Extended Abstracts 2016*, 1, pp. 1–8, 2016.
- [10] M. Sasaki, Y. Sanada, A. Yamamoto, “Application of the forest shielding factor to the maximum-likelihood expectation maximization method for airborne radiation monitoring,” *Radiation Protection Dosimetry*, 184, 3–4, pp. 400–404, 2019.
- [11] 眞田 幸尚, 石崎 梓, 西澤 幸康, ト部 嘉, “有人ヘリコプタを用いた放射線モニタリング,” *分析化学*, 66, 3, pp. 149–162, 2017.
- [12] P. G. Martin, O. D. Payton, J. S. Fardoulis, D. A. Richards, Y. Yamashiki, T. Scott, “Low altitude unmanned aerial vehicle for characterising remediation effectiveness following the FDNPP accident,” *Journal of environmental radioactivity*, 151, pp. 58–63, 2016.
- [13] 普天間 章, 眞田 幸尚, 石崎 梓, 川崎 義晴, 岩井 毅行, 平賀 祥吾, 佐藤 一彦, 萩野谷 仁, 松永 祐樹, 菊池 陽, 嶋田 和真, 外間 智規, 平岡 大和, ト部 嘉, 外川 織彦, 安藤 真樹, 工藤 保, “令和2年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング,” *JAEA-Technology 2021-029*, 2022.
- [14] M. Sasaki, Y. Sanada, E. W. Katengeza, A. Yamamoto, “New method for visualizing the dose rate distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using artificial neural networks,” *Scientific Reports*, 11, 1857, 2021.
- [15] F. Mendes, M. Barros, A. Vale, B. Goncalves, “Radioactive Hot-spot Localization and Identification using Deep Learning,” *Journal of Radiological Protection*, 42–1, 2021.
- [16] Y. Sanada, T. Sugita, Y. Nishizawa, A. Kondo, T. Torii, “The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident,” *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4, pp. 76–80, 2014.
- [17] G. Erdi-Krausz, M. Matolin, B. Minty, J. P. Nicolet, W. S. Reford, E. M. Schetselaar, “Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC,” *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, 1363, 2003.
- [18] 鳥居 健男, 眞田 幸尚, “空からの遠隔放射線モニタリング,” *放射性物質除去技術集成*, エヌ・ティ・エス, 2015.

- [19] R. Kikawa, M. Matsuya, K. Oyama, K. Genda, "Void Area Detection for Efficient UAV Sensing in Radiation Dose Mapping," *Proceedings of 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 430–431, October 2022.
- [20] 鬼川 凌, 大山 勝徳, 源田 浩一, "可変高度の UAV センシングにおける森林地表付近の減衰率特性を考慮した放射線マッピング," *計測自動制御学会論文集*, 59, 6, pp. 269–277, 2023 年 6 月.
- [21] R. L. Grasty, A calibration procedure for an airborne gamma-ray spectrometer, Geological Survey of Canada, 1976.
- [22] R. Kikawa, K. Oyama, K. Genda, "Radiation mapping using a double exponential attenuation model for UAV sensing in forest area," *Proceedings of IEEE Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, pp. 1012–1015, 2022.
- [23] 安田 幸生, "森林内における空間線量率とその 5 年間の推移について," *水利科学*, 61, 5, pp. 102–130, 2017.
- [24] A. Malins, M. Okumura, M. Machida, H. Takemiya, K. Saito, "Fields of view for environmental radioactivity," arXiv preprint, 2015.
- [25] 河瀬 和重, "Gauss-Krüger 投影における経緯度座標及び平面直角座標相互間の座標換算についてのより簡明な計算方法," *国土地理時報*, 121, pp. 109–124, 2011.
- [26] 大森 敏明, "有限の地表面に沈着した放射性核種からの線量率の簡易計算法," *Japanese Journal of Health Physics*, 55-3, pp. 119–135, 2020.
- [27] 五十嵐 貴大, 若林 裕之, "テクスチャ情報を用いた UAV 取得高分解能画像の土地被覆分類精度向上," *日本リモートセンシング学会誌*, 42-2, pp. 101–118, 2022.
- [28] 津田 修一, "線量測定の原理 –G(E)関数による線量測定手法–," *Isotope News*, 706, pp. 59–62, 2013.
- [29] 大森 敏明, 加藤 信介, 金 敏植, 糠塚 重裕, "モンテカルロ法による放射線量の簡易計算法–建物内放射線量の簡易計算法(その 1)–," *日本建築学会環境系論文集*, 81, 727, pp. 835–843, 2016.
- [30] 鳥居 寛之, 小豆川 勝見, 渡辺 雄一郎, 中川 恵一, "放射線を科学的に理解する," *丸善出版*, 2012.

付録 A

実験データと統計

(1) 第3章の実験で使用した UAV 計測時の測定データ (富岡町 2019年6月)

本データは2019年6月に福島県富岡町で収集を行った。合計の有効点数は8,515点となった。本研究の計算において参照したおもな項目は、放射線量、緯度、経度、GPS高度、計測日時、気圧、気温の7つである。

**Table A.1 富岡町の2019年6月のUAV計測時の測定データ
(合計:8,515点, 平均線量率:0.157 μ Sv/h, 表はデータの一部)**

放射線量	緯度	経度	GPS高度	計測日時	気圧	気温
0.1425	37.342262	141.026643	46.4	2019/6/21 10:40	1004.99	25.96
0.1252	37.342262	141.026643	46.4	2019/6/21 10:40	1004.96	25.97
0.125	37.342262	141.026643	46.4	2019/6/21 10:40	1004.92	25.96
0.1055	37.342262	141.026643	46.4	2019/6/21 10:40	1005.01	26.01
0.1199	37.342262	141.026643	46.4	2019/6/21 10:41	1004.87	25.97
0.1528	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.91	25.99
0.1567	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.94	25.98
0.1311	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.92	25.99
0.1066	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.99	26.02
0.127	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1005.03	26.01
0.1145	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.9	25.99
0.1274	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.89	26.03
0.1046	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.92	26.02
0.0952	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.94	26.02
0.1027	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.98	26.04
0.1357	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1004.96	26.06
0.1701	37.342262	141.026643	46.5	2019/6/21 10:41	1005.03	26.08
0.1183	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1005	26.08
0.1197	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1005.06	26.08
0.1484	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1004.97	26.07
0.1235	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1005.26	26.15
0.1327	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1004.92	26.08
0.1022	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1004.96	26.08
0.1243	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1004.97	26.07
0.1194	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1005.07	26.14
0.124	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1005.12	26.15
0.0915	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1004.98	26.11
0.1303	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1004.96	26.1
0.1047	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1004.95	26.1
0.1311	37.342262	141.026645	46.5	2019/6/21 10:41	1005.04	26.15

⋮

上記の表に対応する飛行軌跡が以下の Figure A.1 である。高さ 50m, 30m, 10m で UAV センシングを行い、全部で 9 フライト実施した。

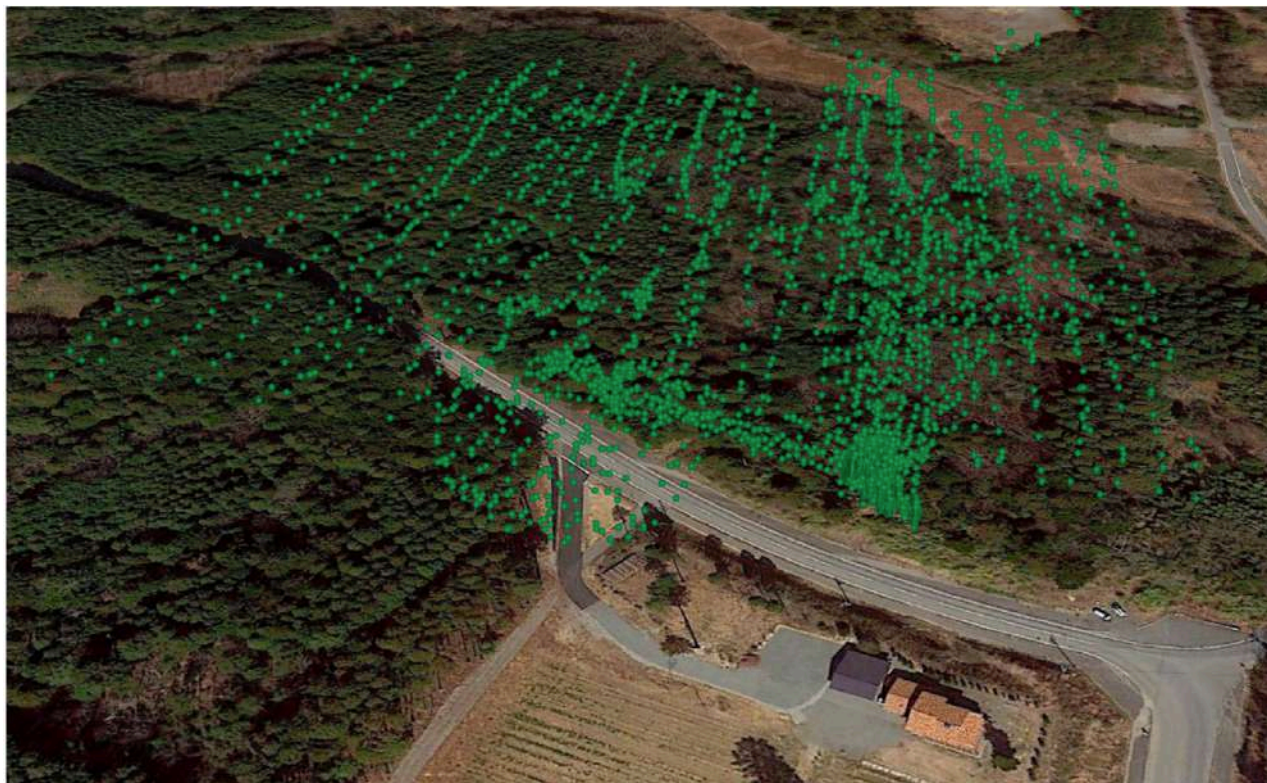


Figure A.1 富岡町の 2019 年 6 月の UAV 計測における飛行軌跡

(2) 第3章の実験で使用した歩行計測時の測定データ (富岡町 2019年6月)

以下は、実験において推定結果の検証のために真値として使用した歩行計測の測定データである。本データは2019年6月に福島県富岡町で収集を行った。合計の有効点数は10,186点となった。

**Table A.2 富岡町の2019年6月の歩行計測時の測定データ
(合計:10,186点, 平均線量率:0.237 μ Sv/h, 表はデータの一部)**

放射線量	緯度	経度	GPS高度	計測日時	気圧	気温
0.2071	37.342182	141.02661	44.9	2019/6/21 11:18	1006.26	28.64
0.197	37.342187	141.026597	44.7	2019/6/21 11:18	1006.33	28.68
0.1566	37.342188	141.02659	44.6	2019/6/21 11:18	1006.34	28.71
0.1833	37.34219	141.026583	44.6	2019/6/21 11:18	1006.37	28.73
0.2019	37.34219	141.026583	44.6	2019/6/21 11:18	1006.22	28.7
0.193	37.342192	141.026575	44.5	2019/6/21 11:18	1006.26	28.73
0.1782	37.342193	141.026557	44.4	2019/6/21 11:18	1006.22	28.74
0.1799	37.342195	141.026548	44.4	2019/6/21 11:18	1006.26	28.76
0.1873	37.342195	141.02654	44.4	2019/6/21 11:18	1006.3	28.77
0.1795	37.342195	141.02654	44.4	2019/6/21 11:18	1006.27	28.78
0.1598	37.342198	141.026532	44.4	2019/6/21 11:18	1006.2	28.76
0.1499	37.3422	141.026517	44.2	2019/6/21 11:18	1006.32	28.83
0.144	37.342202	141.026508	44.2	2019/6/21 11:18	1006.28	28.82
0.1325	37.342203	141.0265	44.3	2019/6/21 11:18	1006.29	28.81
0.1373	37.342203	141.0265	44.3	2019/6/21 11:18	1006.23	28.81
0.1205	37.342203	141.026493	44.3	2019/6/21 11:18	1006.38	28.84
0.1649	37.342205	141.026478	44.3	2019/6/21 11:18	1006.3	28.84
0.131	37.342207	141.026472	44.3	2019/6/21 11:18	1006.28	28.83
0.1233	37.342207	141.026465	44.2	2019/6/21 11:18	1006.29	28.81
0.1532	37.342207	141.026465	44.2	2019/6/21 11:18	1006.28	28.85
0.1584	37.342208	141.026458	44.2	2019/6/21 11:18	1006.31	28.84
0.1519	37.342212	141.026443	44.2	2019/6/21 11:18	1006.29	28.85
0.1467	37.342213	141.026435	44.2	2019/6/21 11:18	1006.27	28.84
0.1511	37.342215	141.026425	44.1	2019/6/21 11:18	1006.32	28.87
0.1923	37.342215	141.026425	44.1	2019/6/21 11:18	1006.35	28.89
0.1675	37.342217	141.026418	44	2019/6/21 11:18	1006.31	28.87
0.1833	37.342222	141.026403	43.9	2019/6/21 11:18	1006.27	28.89
0.1854	37.342225	141.026393	43.8	2019/6/21 11:18	1006.27	28.89
0.1995	37.342227	141.026385	43.7	2019/6/21 11:18	1006.32	28.91
0.1976	37.342227	141.026385	43.7	2019/6/21 11:18	1006.25	28.91
0.1758	37.342228	141.026377	43.7	2019/6/21 11:18	1006.22	28.9

⋮

以下の Figure A.2 の歩行軌跡における濃淡は地上放射線量率の高さを表しており色が赤に近づくほど高い線量率、白に近いほど低い線量率を表している。本データで裸地領域の大部分は相対的に線量率の低い領域であり、森林領域は相対的に線量率の高い領域で占められる。



Figure A.2 富岡町の 2019 年 6 月の歩行計測時の歩行軌跡

(3) 第3章の実験で使用した測定データ (グラウンド 2021年2月)

以下は、第3章の実験で低高度 UAV センシングの特徴を分析するために収集した測定データである。本データは2021年2月に平面に近いグラウンドで収集を行った。合計の有効点数は14,662点となった。本データの収集において、測定範囲の中心に放射性同位体 (コバルト 60) を設置しデータの収集を行っている。

Table A.3 グラウンドのデータ

(合計:14,662点, 平均線量率:0.081 μ Sv/h, 表はデータの一部)

放射線量	緯度	経度	GPS高度	計測日時	気圧	気温
0.0946	37.358197	140.386485	231.9	2021/2/25 13:41	998.02	12.35
0.0909	37.358205	140.386482	230.4	2021/2/25 13:41	998.06	12.29
0.0702	37.358207	140.38648	230	2021/2/25 13:41	998.07	12.21
0.0815	37.358215	140.386478	231.3	2021/2/25 13:41	997.95	12.1
0.0657	37.358213	140.386485	232.4	2021/2/25 13:41	998.07	12.05
0.0813	37.358213	140.386488	232.7	2021/2/25 13:41	998.09	11.98
0.0672	37.358213	140.38649	232.8	2021/2/25 13:41	998	11.84
0.0644	37.358207	140.386495	233.2	2021/2/25 13:41	998.2	11.81
0.0789	37.3582	140.386493	233.2	2021/2/25 13:41	998.1	11.69
0.099	37.3582	140.386497	233.6	2021/2/25 13:41	998.13	11.62
0.0818	37.3582	140.3865	233.9	2021/2/25 13:41	998.21	11.56
0.0849	37.358195	140.386502	234.1	2021/2/25 13:41	998.23	11.47
0.0595	37.358197	140.386502	233.5	2021/2/25 13:41	998.2	11.39
0.0858	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.35	11.33
0.0726	37.358195	140.386503	233.4	2021/2/25 13:41	998.2	11.24
0.0752	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.29	11.18
0.0499	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.27	11.1
0.0841	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.35	11.05
0.0562	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.25	10.93
0.0636	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.19	10.85
0.0986	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.21	10.8
0.0711	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.27	10.71
0.0895	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.33	10.67
0.089	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.39	10.59
0.0825	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.3	10.53
0.0682	37.358195	140.386505	233.4	2021/2/25 13:41	998.43	10.49
0.0687	37.358188	140.386503	233.7	2021/2/25 13:41	998.29	10.43
0.0686	37.358183	140.386503	233.9	2021/2/25 13:41	998.47	10.43
0.1025	37.358182	140.3865	234.4	2021/2/25 13:41	998.34	10.38
0.073	37.358182	140.3865	234.4	2021/2/25 13:41	998.42	10.34

⋮

上記の表の飛行軌跡を表したものが以下の Figure A.3 である。UAV センシングは、地上からの高さ 50m と 15m でそれぞれ実施され、計 4 フライトのデータが得られた。



Figure A.3 グラウンドにおける UAV の飛行軌跡

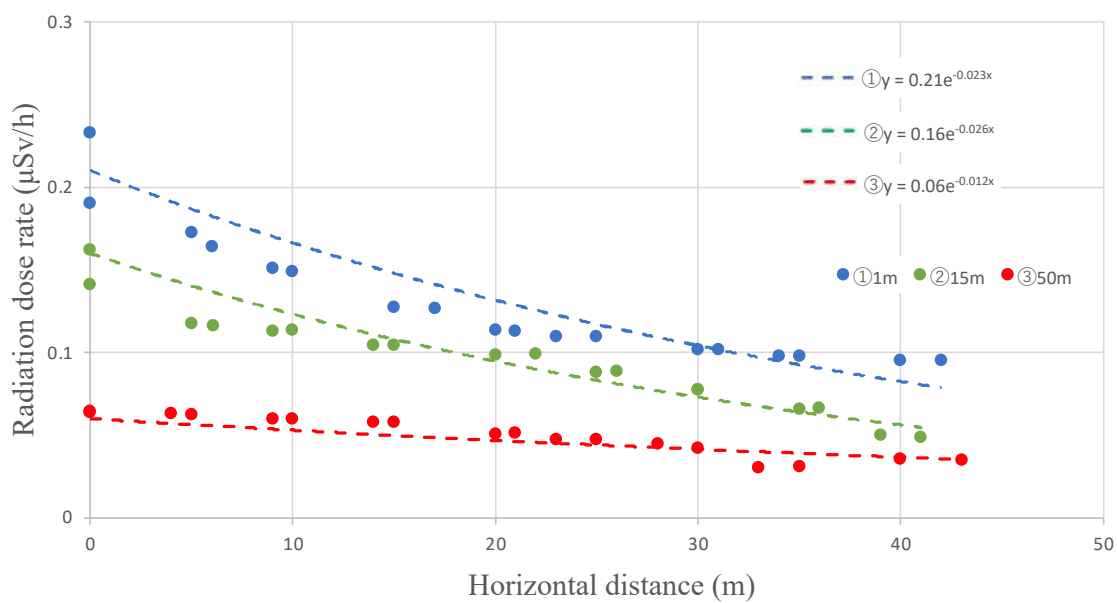


Figure A.4 グラウンドのデータから作成したグラフ

(4) 第4章の実験で使用した UAV 計測時の測定データ (富岡町 2022年12月)

以下は、第4章の実験に使用した UAV 計測時の測定データである。本データは2022年12月に福島県富岡町で収集を行った。合計の有効点数は167点となった。

Table A.4 富岡町の2022年12月の UAV 計測時の測定データ
(合計:167点, 平均線量率:0.176 μ Sv/h, 表はデータの一部)

放射線量	緯度	経度	GPS高度	計測日時	気圧	気温
0.1359	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.73	33.59
0.1489	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.71	33.59
0.1279	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.74	33.6
0.091	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.72	33.6
0.1609	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.67	33.58
0.1607	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.69	33.6
0.1189	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.66	33.58
0.1296	37.342358	141.026593	38.2	2022/12/23 12:00	984.74	33.61
0.1333	37.34236	141.02659	38.3	2022/12/23 12:00	984.69	33.6
0.116	37.34236	141.02659	38.3	2022/12/23 12:00	984.57	33.57
0.1601	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.66	33.6
0.1177	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.62	33.59
0.187	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.62	33.6
0.1118	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.58	33.6
0.119	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.6	33.6
0.126	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.59	33.59
0.1179	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.62	33.59
0.1428	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.73	33.63
0.1125	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.66	33.61
0.1326	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.7	33.64
0.151	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.66	33.62
0.0936	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.74	33.66
0.1284	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	984.87	33.64
0.1387	37.34236	141.026588	38.3	2022/12/23 12:00	985.12	33.62
0.1523	37.34236	141.026587	38.2	2022/12/23 12:00	984.61	33.63
0.1134	37.342357	141.026585	38.2	2022/12/23 12:00	984.39	33.62
0.1289	37.342355	141.026583	38.4	2022/12/23 12:00	984.53	33.67
0.1206	37.342357	141.02658	39	2022/12/23 12:00	984.17	33.64
0.1572	37.342362	141.026582	39.5	2022/12/23 12:00	983.75	33.62

上記の表の飛行軌跡を表したものが以下の Figure A.5 である。低高度で飛行を行うと樹木によって作成した絨毯飛行ルートが飛行できない箇所があるため、障害物の高さを考慮して高さ 35m, 40m, 50m でそれぞれ UAV センシングを行った。

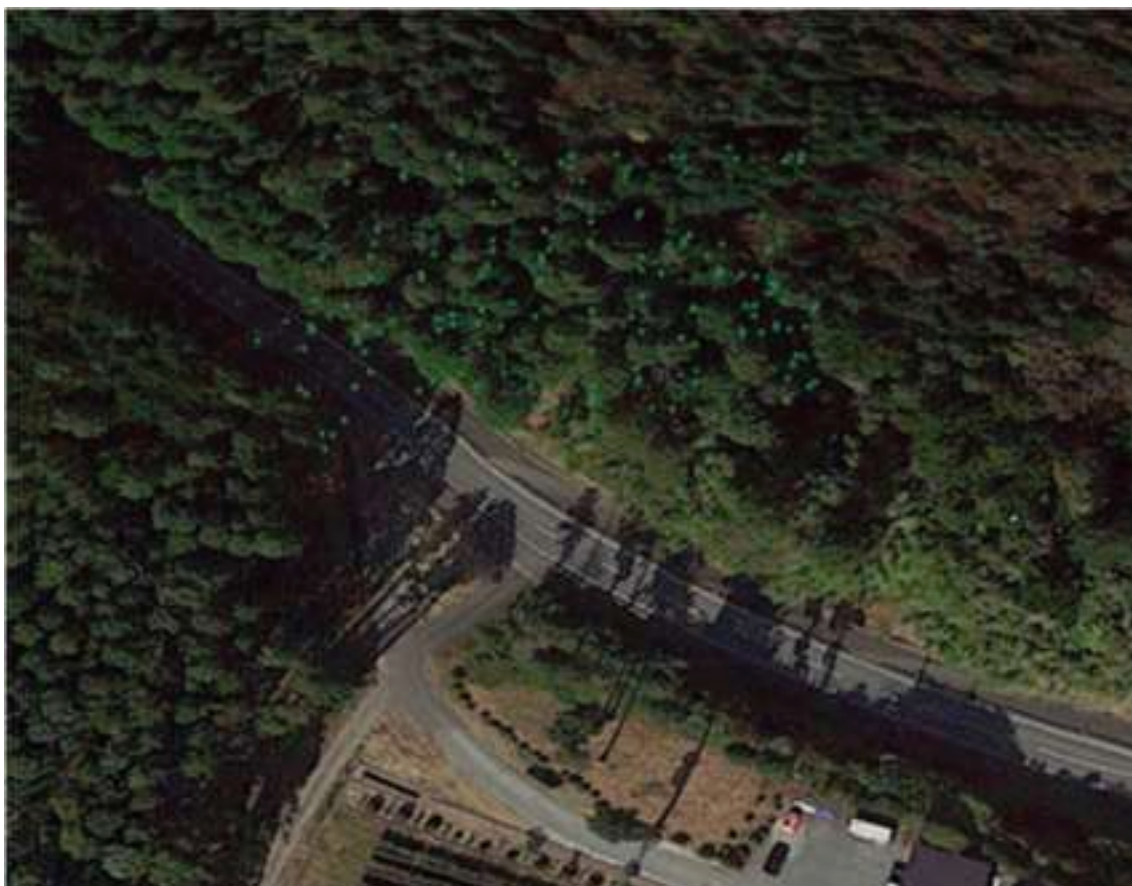


Figure A.5 富岡町の 2022 年 12 月の観測領域内上空の飛行軌跡

以下は、第4章にて計算不可能であった領域の大きさを表にまとめたものである。4章の本文では例として9m×13mの空乏領域を示しているが、以下の表から、実験での空乏領域サイズは一辺10mを超えるとときに出現することが確認できる。

Table A.5 計算不可能な空乏領域(空乏領域50%の場合)

計算回数(回目)	RMSE	計算不可	計算不可領域Xサイズ(m)	計算不可領域Yサイズ(m)	空乏サイズ(m ²)
2	0.06116018	不可	14	10	140
4	0.06266948	不可	8	11	88
9	0.06685827	不可	11	15	165
10	0.074067	不可	8	14	112
11	0.07361076	不可	10	9	90
15	0.06108939	不可	13	7	91
19	0.06699504	不可	8	12	96
20	0.06907654	不可	7	14	98
21	0.07467904	不可	6	16	96
23	0.06360135	不可	11	11	121
28	0.07126467	不可	9	8	72
35	0.06411584	不可	15	10	150
39	0.07198499	不可	14	13	182
40	0.0625921	不可	6	10	60
51	0.07340628	不可	7	18	126
59	0.06506448	不可	10	9	90
64	0.07430398	不可	6	11	66
68	0.07442324	不可	9	10	90
71	0.07244919	不可	7	13	91
80	0.07227172	不可	14	10	140
88	0.07001659	不可	6	10	60
91	0.07306898	不可	8	9	72
99	0.06105749	不可	9	12	108

付録 B

**提案手法の補正係数に関する参考資料
(点減衰核積分法のビルドアップ係数)**

(1) 点減衰核積分法に基づく線量計算

ある放射性核種から放出されるエネルギー $E_0(\text{MeV})$ の γ 線を考える。線源を十分に小さい n 個の体積領域に分割し($i = 1 \sim n$)、体積領域 i から放出される γ 線による評価点(検出器)における線量率 $D_i(\mu\text{Sv h}^{-1})$ を計算する。

$$D_i = KB_i\phi_i$$

K : 線量換算係数($\mu\text{Sv h}^{-1}/(\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$)

B_i : 線量ビルドアップ係数

ϕ_i : 直接線の光子フルエンス率($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

式に示すように直接線の光子フルエンス率 ϕ に線量換算係数 K を乗じて直接線の線量率 D_i を、直接線の線量率に平均的な線量ビルドアップ係数 B を乗じて直接線と散乱線両方の寄与を合算した線量率 D を計算する。

$$D = K \sum_{i=1}^n B_i \phi_i$$

線量ビルドアップ係数 B_i は光子が体積領域 i から評価点に至るまでの無次元平均移動距離 $\tau_i(\text{mfp})$ の関数として表される

(2) 二層線量ビルドアップ係数

点減衰核積分法では、光子が媒質を移動する間に受けるコンプトン散乱による影響を線量ビルドアップ係数で表して計算に用いるので、線量ビルドアップ係数が計算精度を決めると言ってよい。前節で紹介した線量ビルドアップ係数は単一の物質を対象として求められている。したがって、点減衰核積分法はこのような単一層媒質を対象とする場合は、高精度な計算結果が期待できる。しかし、対象とする系が異なる複数の物質から構成されている場合は、線量ビルドアップ係数をどのように扱うべきかという大きな課題が残されている。点減衰核積分法に基づく QAD などでは、遮蔽体が多層の場合でも線量ビルドアップ係数を単一層の物質で代表する

必要があり、構成する物質のうち最大のものを利用するか、または信頼性が確認された値を用いることとしている。一方、使用済核燃料や放射性廃棄物の貯蔵設備や輸送設備、原子炉等の核施設や放射線利用施設の γ 線遮蔽計算や安全性解析に多層線量ビルドアップ係数を組み込んだ点減衰核法が使用されることが多い。二層線量ビルドアップ係数 $B(\tau_1, \tau_2)$ の基本となる経験式は以下で示される。

$$B(\tau_1, \tau_2) = B_2(\tau_2) + C(\tau_2)[B_2(\tau_1 + \tau_2) - B_2(\tau_2)] \frac{B_1(\tau_1) - 1}{B_2(\tau_2) - 1}$$

$C(\tau_2)$: 修正係数

τ : 無次元平均移動距離(mfp)

$B_1(\tau_1), B_2(\tau_2)$: 単一層の線量ビルドアップ係数

添字 1 は一層目、2 は二層目を示す。 $C(\tau_2)$ は修正係数である。 τ は無次元平均移動距離 (mfp) である。 $B_1(\tau_1), B_2(\tau_2)$ はそれぞれ単一層の線量ビルドアップ係数である。地表に沈着した放射性核種から環境中への線量を考えると、空気と土壌の二つの物質からなる系である。このような場合は、単一層の線量ビルドアップ係数を組み合わせて何らかの修正を施す必要がある。

例えば周辺の空気に関するビルドアップ係数や核種が地表面に沈着した場合の土壌に関するビルドアップ係数の和をとる。ただし、通常シミュレーション時に計算する際、空気カーマ率、実効線量率、あるいは周辺線量当量率から係数のカタログ値を参照している。

(3) 本研究の提案手法 (Step2) と線量ビルドアップ係数の関係

本研究の提案手法 (Step2) における垂直方向と水平方向の距離減衰は線量ビルドアップ係数 B に相当する係数であり、Step2 での補正係数 f は上式から一部求められる可能性が高く、本実験の観測領域のサンプリングデータから妥当な係数を求める場合、その係数を用いた繰り返しの実験検証が今後必要である。

付録 C

空乏領域判定法

第4章で説明した空乏領域検出法は、本研究では空乏領域が領域内にどれほど存在するかを確認するために使用しているが、既存研究では空乏領域を検出したのちに空乏領域にウェイポイントを設置し経路計画を行うことで再観測を行うための手法である。以下は、空乏領域判定法を用いた後に経路計画を行うまでの手順を示した内容である。

手順

Step1: 空乏領域判定

UAV の測定データに対して空乏領域判定法を用いて空乏領域の検出を行う。(空乏領域判定法は 4.2 にて説明)

Step2: 空乏領域から追加観測点の設置

得られた空乏領域から再観測のためのウェイポイントを設置する必要がある。しかし、全ての空乏領域をウェイポイントとした場合、空乏領域は小さな領域であるため UAV での観測に向けた範囲ではなくなってしまう。そのため UAV が飛行可能な最小単位の長さ l で領域を分割し、そのセルの中心にウェイポイントを設置する。例えば、1m メッシュで得られた空乏領域 (Figure A.6 (左図)) があるとき、飛行可能なメッシュサイズ l を 3m とすると Figure A.6 (右図) のようにウェイポイントを配置する。このとき、設定した 3m のメッシュサイズ内にある 1m メッシュの空乏領域の数にかかわらず、3m のメッシュ内に空乏領域があるポイントの中心に再観測のウェイポイントを設置する。この場合最終的に得られる結果は 1 辺が 3m メッシュの放射線量率マップである。例えば、1 辺が 50m の観測領域で 1 辺 5m の分解能で放射線量率マップを取得したい場合、1m メッシュの空乏領域は最大で 2500 箇所判定され、再観測のためのウェイポイントは最大で 100 ポイント設置される可能性がある。

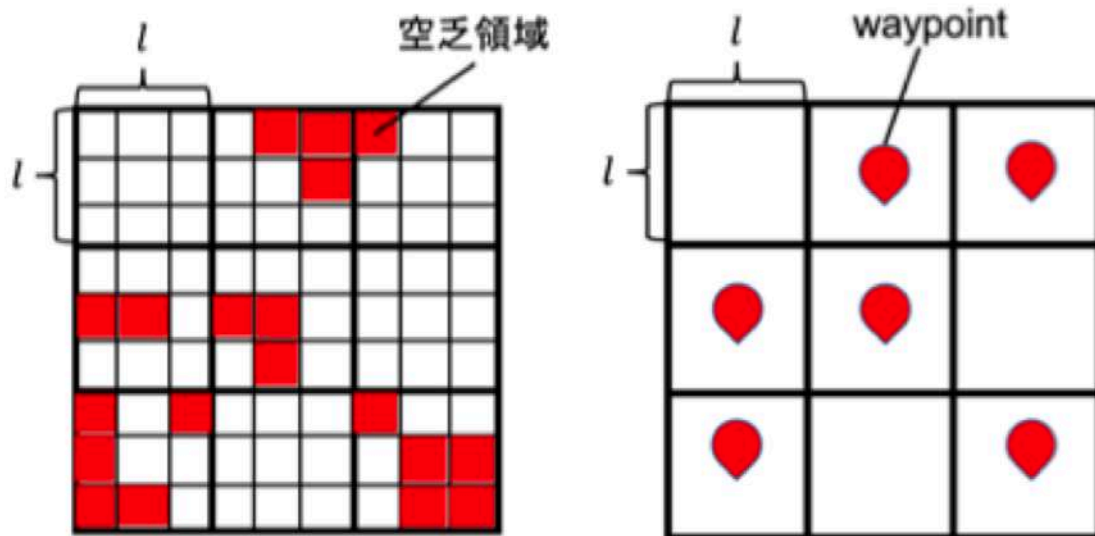


Figure C.1 空乏領域(左図)と設置されたウェイポイント

Step3: UAV の経路計画

追加観測点として得られた再観測のためのウェイポイントの座標 (x, y) をノードとして最短の巡回路を探索する. 全てのウェイポイントを1度だけ訪れ距離最短経路を探索するため, この問題は巡回セールスマン (TSP : Traveling Salesman Problem) に帰着する. TSP は NP 困難な問題であるため, 近似解法で解答することが提案されている. この問題の解決策の1つとして遺伝的アルゴリズムが挙げられる. 遺伝的アルゴリズムは生物界の進化の仕組みを模倣した近似解探索手法であり, 最も一般的に用いられているアルゴリズムである. 基本的な遺伝的アルゴリズムはある世代 (Generation) を形成している個体 (Individual) の集合 (Population) の中で, 目的となるタスクへの適応度 (Fitness) の高い (または低い) 個体が優先的に生き残るようになっている (淘汰). 今回の場合は距離を最短にすることがタスクに当たり, 出来るだけ適応度が小さいものを優先的に選択していくことにより, 最短経路の近似解を得る. さらに, 交叉 (Crossover) や突然変異 (Mutation) といった遺伝子操作によって次の世代の個体が形成されていく. 本研究では交叉方法として順序交叉, 次世代選出方法はランダムに個体を選出し, その中で適応度の高い個体を選択するトーナメント方式を採用し, 突然変異の確率を 1%とした. 突然変異はある確率で遺伝子の一部を変化させる操作で, このパラメータが低すぎる場合には局所的な最適解に陥りやすくなり, 逆にこのパラメータが高すぎると解が収束しにくくなってしまいう特徴がある.

$$fitness(\theta) = \sum_{i=0}^N (distance_i + C|1 + \cos\theta_i|) \quad (11)$$

式(11)は UAV の旋回角度に応じて重みづけした適応度関数である。ユークリッド距離 (distance) の算出時に座標上の点からベクトルを用い旋回角度を算出し、旋回角度に応じたコストを付与することで旋回角度を考慮した適応度関数を定義した。適応度は遺伝的アルゴリズムにおいてその個体の適応性を示す。適応度を実現するためにユークリッド距離を求め、座標上の基準のウェイポイントを X_i 点とし、直前に通過した点を X_{i-1} 、次に通過する点を X_{i+1} とし、基準点からそれぞれを結ぶ二本のベクトルのなす角から旋回角度 $\cos\theta$ の値を算出する。旋回角度 $\cos\theta$ の最大角度は 180° であるから、 $\cos\theta$ の取りうる値は $-1 \leq \theta \leq 1$ である。 X_i 座標の緯度、経度である (s_j, s_k) から distance を算出した後、distance に UAV の旋回に基づくコストである C と旋回角度 $\cos\theta$ を用い、式(2)から適応度関数である $Fitness(\theta)$ を求める。 $|1+\cos\theta|$ は旋回角度の大きさを示し、旋回角度に応じて 0 倍から 2 倍のコストを距離 distance に付与する。

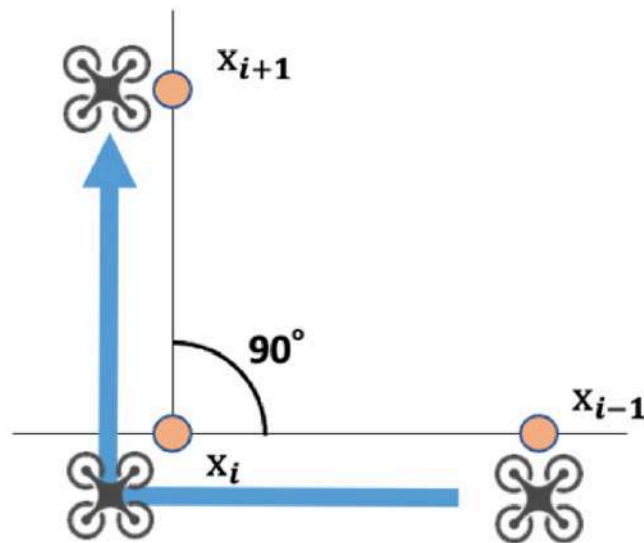


Figure C.2 旋回の場合

旋回角度の実現について詳しく説明する。

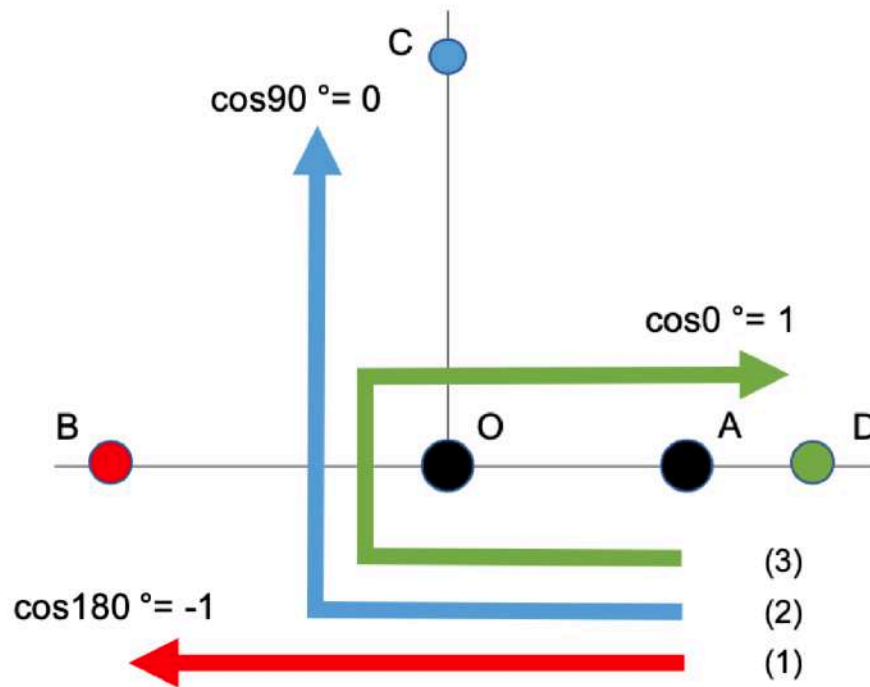


Figure C.3 旋回角度の実現方法

UAV の現在地を地点 O とする。

(1) 地点 A から地点 O を経由して地点 B に UAV が移動する場合

二本のベクトル \vec{OA} , \vec{OB} の内積を利用してなす角 θ を算出する。この場合なす角 θ は 180° になり、 $\cos 180 = -1$ より前述(2)式の絶対値の中身は 0 になり旋回によるコストは付与されない。

(2) 地点 A から地点 O を経由して地点 C に UAV が移動する場合

二本のベクトル \vec{OA} , \vec{OC} の内積を利用してなす角 θ を算出する。この場合なす角 θ は 90° になり、 $\cos 90 = 0$ より前述(2)式の絶対値の中身は 0 になり旋回によるコストはコスト係数×1 倍だけ付与される。

(3) 地点 A から地点 O を経由して地点 D に UAV が移動する場合

二本のベクトル \vec{OA} , \vec{OD} の内積を利用してなす角 θ を算出する。この場合なす角 θ は 0° になり、 $\cos 0 = 1$ より前述(2)式の絶対値の中身は 0 になり旋回によるコストはコスト係数×2 だけ付与される。

上式に加え，distance を掛け算で繋ぐことでより角度の重みを考慮したものが以下の式である。

$$Fitness(\theta) = \sum_{i=0}^n (distance_i \times C|1 + \cos \theta_i|) \quad (12)$$

Figure A.9 はある観測領域内にて空乏領域からウェイポイントを設置し，遺伝的アルゴリズムを用いて経路探索を行った結果である。

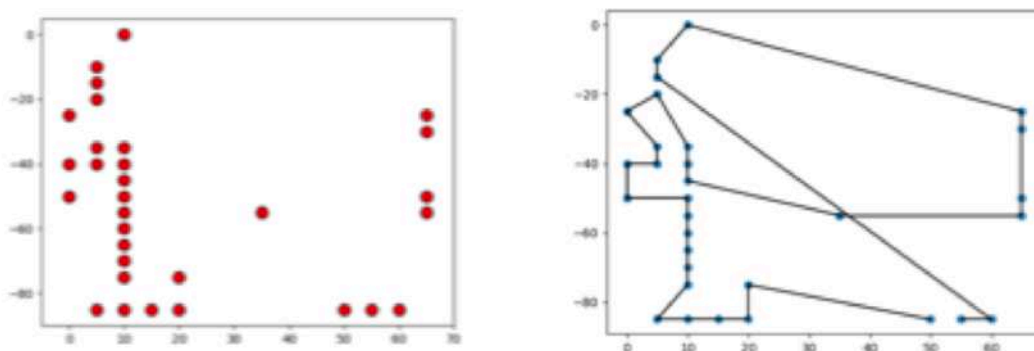


Figure C.4 観測領域に設置されたウェイポイントと遺伝的アルゴリズムによる経路探索結果

Step1 の改善版: 標準偏差を用いた空乏領域の検出法

本研究では以前，従来の空乏領域判定法の課題を解決するために，標準偏差を用いた空乏領域判定法を提案した．まず，従来の空乏領域判定法で無視されていた観測領域内に観測点が1つしか存在しない場合の処理を加える．地上の観測値の推定に必要な観測点数を定義することにより，推定に使用される観測点の数が1つになることを避ける．提案手法では，観測領域内の観測点の数が1つしかない場合も観測点が存在しないときと同様に空乏領域と判定することで，確実に観測領域内に複数の観測点が存在する状況を確認する．また，観測領域内に複数の観測点が存在するとき，標準偏差を用いて空乏領域か否かを判定する．提案する判定式を以下の式に示す．

$$rea(P_k) = \begin{cases} 0 & \text{if } \left(a \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_k - \bar{z})^2} < s_k \right) \vee (n_k < 2) \\ 1 & \text{if } \left(a \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_k - \bar{z})^2} \geq s_k \right) \wedge (n_k \geq 2) \end{cases} \quad (13)$$

判定する観測領域(= $area(P_k)$)において観測領域内に観測点が2つ以上存在する場合、観測値全体の標準偏差と観測領域内の観測点の標準偏差 s_k を比較し、 s_k の方が大きい場合 $area(P_k)$ を空乏領域とする。このとき変数 a は標準偏差の許容範囲を任意に決定する係数である。標準偏差を比較することで、局所的に観測値にばらつきがある領域を抽出する。提案手法を以下の Figure C.5 に示す。

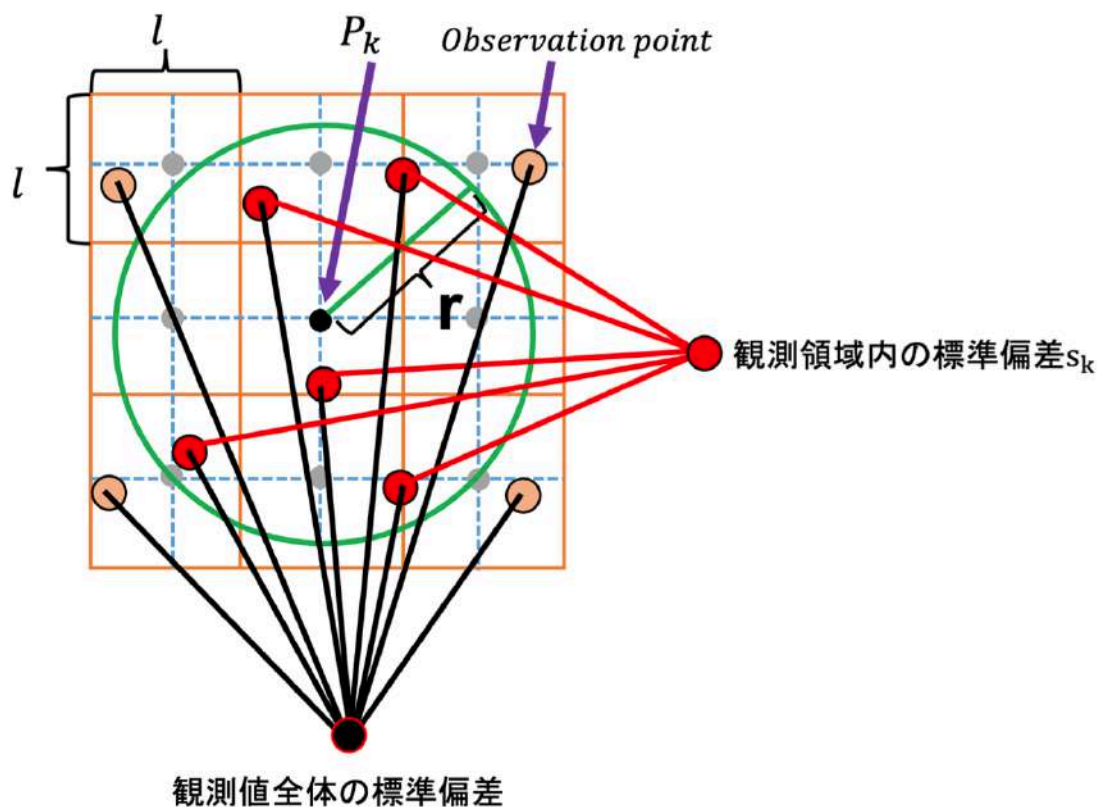


Figure C.5 提案手法の空乏領域判定