

## 論文の内容の要旨

氏名：鬼川 凌

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：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

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、数メートル区画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。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。特に数メートル区画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面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。また、数メートル区画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）が出現する問題も指摘されている。

以上の背景から、本研究では、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マップを数メートル区画単位の高い解像度で推定する手法を明らかにすることを目的としている。

本論文を要約すると以下の通りである。

第 1 章は「序論」であり、本研究に関連する放射線マッピングの分野に関する背景、低高度 UAV センシングとその必要性、本研究の目的を示した。

第 2 章の「低高度 UAV センシングによる放射線マッピングの課題」では、UAV センシングによる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示した。

地上放射線量率の推定を行う従来手法は高さ 100m 以上の測定値を用いた計算を前提としており、低高度 UAV センシングの測定値を用いて計算する手法はこれまでに検討されていない。従来手法の一つである FSM は、地表面を一律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。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。

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が課題となることを示した。

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比率と分布に着目し、推定領域の実環境への適用性を評価し有効性を明らかにした。

第3章の「地表付近の減衰率特性を考慮した放射線マッピング」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した。

最初に、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  $^{60}\text{Co}$  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、以下のことを明らかにした。

- A) 水平方向の放射線減衰率は、高さ 50m 以上では水平方向に対して概ね均一であるが、50m 以下では地表面に近づくにつれて放射性同位体から水平方向の距離が離れるほど大きな減衰率となることが確認された。以上から、高さ 50m 以下を対象とする低高度 UAV センシングにおいては、水平方向の放射線減衰率の変化を考慮する必要がある。
- B) 放射性同位体付近の地上放射線量率の推定値については、高さ約 50m で測定した放射線減衰率を用いた FSM による推定値は実測値からの乖離が大きいが、推定点から近い高さ約 50m 未満で測定した放射線減衰率を用いた FSM の推定値は実測値からの差が小さくなることが確認された。以上から、50m 以上を含む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。

上記で明らかにしたことを踏まえ、次に本研究では、地表面の放射線量率の不均一性を反映し、かつ空乏領域の影響を低減するため、空間の鉛直方向の放射線減衰率に加えて新たに水平方向の放射線減衰率を導入し、地上の推定点上の測定値に限定することなく周囲空間の複数の測定値を対象に鉛直方向と水平方向の放射線減衰率を考慮して加重平均をとる新たな地上放射線量率の推定法を提案した。

本提案手法について、地表面の放射線源が不均一な条件で地上放射線量率が一部高い森林を含む観測領域における有効性を検証するため、帰還困難区域付近の低高度 UAV センシングの測定値を用いて従来手法の FSM と提案手法を用いた場合の地上放射線量率の推定値と実測値を比較し、以下のことを明らかにした。

- A) 提案手法を用いたときの推定値と実測値の差は、FSM の結果と比べ平均二乗平方根誤差 (RMSE) を指標として約 40%以上改善し、地上放射線量率が一部高い森林内の推定点が含まれる場合においても推定値と実測値は乖離しないことが示された。
- B) 上記の結果についてさらに、周囲空間の複数の測定値を用いて加重平均をとる計算 (ステップ 1) と空間の鉛直方向の放射線減衰率に加えて新たに水平方向の放射線減衰率を導入する計算 (ステップ 2) それぞれの有効性を段階的に検証するため、提案手法のステップ 1 のみの結果と全ステップの結果に分け FSM の結果と推定値と実測値の差を比較した結果、最初のステップ 1 の結果にて誤差が縮小するだけでなく、全 2 ステップの結果を加えるとさらに縮小し、それぞれの計算方法に推定誤差を改善する効果があることが示された。

以上の結果から、地表面に不均一な放射線源が見られる場合において提案手法が低高度 UAV センシングによる推定に有効であることを明らかにした。

第4章の「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」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。

帰還困難区域付近の測定値に対して、先行研究の空乏領域検出法に従い空乏領域の比率が約 20%、約 50% となるようにランダムに測定値を削除し、次に提案手法を用いて地上放射線量率を推定し、以下を明らかにした。

- A) 空乏領域の比率が約 20%および 50%の場合、RMSE を指標とする推定値と実測値の推定誤差は空乏領域が存在しない場合と比べて、歩行計測で使用可能な放射線検出器の測定値と真値との差を表す指示誤差 (15%) より十分に小さいことを確認した。
- B) 空乏領域の比率が 50%を超える場合、局所的な空乏領域の集中が生じるため、推定点の近傍範囲内に測定点が 1 つも存在しないことにより推定値が計算不可能となる箇所が一部生じる。この場合

においても推定値が得られる箇所では推定誤差はほとんど変化しないが、推定値が一部得られないために比較検証が難しくなる。

以上の結果から、ランダムに存在する空乏領域の比率が50%程度と高い場合においても、提案手法を用いることで地上放射線量率を小さい誤差で推定でき、提案手法が空乏領域の影響を低減できることを明らかにした。

第5章は「結言」であり、本研究で得られた成果として、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新たな手法を提案し、その有効性と各手法の適用可能な範囲を考察した。

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マッピングの技術として寄与するものである。