

## 論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査）教授 源田 浩一

（副査）教授 若林 裕之 准教授 大山 勝徳

東北学院大学准教授 高橋 秀幸

福島第一原発事故の避難指示解除を目指して放射能除染を計画する区域では、地上の放射線量率マップを数メートル区画で必要とするため、従来の数百メートル区画を対象とする UAV（無人航空機, Unmanned Aerial Vehicle）センシングよりも低い高度で放射線量率を測定する『低高度 UAV センシング』が求められる。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、地表の放射線源の不均一性や地形の起伏等を考慮する必要がある。放射線源が均一にあると仮定する FSM (Flat Source Model) 等の従来手法を適用する場合は推定値が実測値から乖離する問題がある。また、低高度 UAV センシングでは飛行経路の揺らぎや測定点数の不足の影響により推定誤差が拡大する領域（空乏領域）が出現する問題がある。

このようなことから、本研究では、低高度 UAV センシングを用いて地上放射線量率を数メートル区画単位で推定する手法を提案し、危険困難区域付近の実測値等を用いて提案手法の有効性を明らかにすることを目的としている。

本論文は、以下 5 章から構成されている。

第 1 章では、本研究に関連する放射線量率マッピングに関する背景、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 章では、従来手法の FSM 等を用いて低高度 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、地表の放射線源の不均一性や空乏領域の影響により、推定値と実測値が大きく乖離する問題があることを示した。

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ることを前提としており、高さ 50m 以下を対象とする低高度 UAV センシングの測定値を活用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、地表を一樣な放射線源と仮定し、地上から 300m 程度の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、地形の起伏や土地被覆の種類等によって生じる地表の放射線源の不均一性が強く影響し、推定値が実測値から大きく乖離する問題が指摘されている。

また、低高度 UAV センシングでは、数メートル区画単位で空間の放射線量率を測定するため、飛行経路の揺らぎ等により測定値が得られず、地上放射線量率の推定値と実測値の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を用いて地上放射線量率を推定するとき、(1) 地表の放射線源の不均一性の考慮と、(2) 空乏領域の出現が課題となることを示した。

これらの課題に対し、第 3 章にて課題 (1) および (2) を解決するための地上放射線量率の推定手法を提案し、第 4 章にて課題 (2) に関し空乏領域の比率と分布に着目して提案手法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章では、低高度 UAV センシングの測定値を用いた地上放射線量率の推定方法として、地表の放射線源の不均一性と空乏領域の出現を考慮した新たな推定手法を提案した。

まず、放射線源からの距離と放射線減衰率の関係、および地上放射線量率の推定誤差の傾向を把握するために、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 に搭載した高感度の放射線検出器を用いて測定し、以下を明らかにした。

- A) 水平方向の放射線減衰率は、高さ 50m 程度より高い高度では水平方向に対してほぼ一定であるが、それ以下では地表面に近づくにつれて放射性同位体を置いた地点から水平方向に距離が離れるほど大きな減衰率となる。このため、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) 放射性同位体を置いた地点で FSM を用いた地上放射線量率の推定値は、高さ 50m 程度の測定値から得た放射線減衰率を用いた推定値は実測値からの乖離が大きいが、それ以下の空間の測定値から得た放射線減衰率を用いた推定値は実測値からの差が小さくなる。このため、高さ 50m 以上を含む全空間の測定値から得た放射線減衰率を用いた推定値は誤差が大きくなることが想定され、高さ 50m 以下の空間の測定値から得た放射線減衰率を使用し、かつ推定点に近い測定値を優先して加重平均することにより推定誤差を低減できる。

次に、地表の放射線源の不均一性を反映し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た。これにより、推定点の直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利用することが可能となる。以上から、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手法を提案した。

提案手法の有効性を検証するため、地表の放射線源が不均一な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誤差を比較し、以下のことを明らかにした。

- A) 提案手法を用いたとき、FSM の結果と比べ、推定誤差を平均二乗平方根誤差 (RMSE) で約 40%以上改善し、地表の放射線源が不均一な帰還困難区域付近においても高い精度で地上放射線量率を推定できることが示された。
- B) 提案手法に水平方向の放射線減衰率を導入したことは、導入しない場合と比べ、特に推定点と測定点の高度差が小さく水平方向に離れた測定点を用いた推定値の誤差を大きく減少させ、低高度 UAV センシングの測定値を用いた推定誤差の改善に効果的であることが示された。

以上の結果から、地表の放射線源が不均一であ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章では、提案手法の適用性を、低高度 UAV センシングによ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場合や空乏領域が集中する場合等においても提案手法が高い精度で地上放射線量率を推定できることを明らかにした。

帰還困難区域付近の低高度 UAV センシングの測定値に対して、先行研究で定義されている空乏領域の考え方に従い、ランダムに空乏領域を設定したとき、提案手法を用いた推定値に対し以下の結果を得た。

- A) 空乏領域の比率が 50%程度の場合、推定誤差は RMSE で  $0.07\mu\text{Sv/h}$  未満であり、空乏領域が存在しない場合 ( $0.06\mu\text{Sv/h}$  未満) とほぼ変わらず、地上放射線量率の推定値と実測値の差の拡大が抑えられている。
- B) 空乏領域の比率が概ね 50%を超えるとときに局所的な空乏領域の集中が存在し、提案手法で使用する推定点の検索半径内に測定点が存在しないために推定値が得られない場合がある。

以上の結果から、ランダムに空乏領域を設定し、比率を高めた場合においても、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章では、本研究で得られた成果と今後の課題について総括した。

以上のことから、本論文では、低高度 UAV センシングを用いて数メートル区画単位の地上放射線量率を推定するため、複数の測定値の加重平均と水平方向の放射線減衰率を新たに導入した独創的で学術性の高い手法を提案し、また帰還困難区域付近の実測値等を用いて本手法が従来手法と比べ高い精度で地上放射線量率を推定できる有用性を明らかにしている。

このように、本研究は、放射能除染のためには不可欠な数メートル区画単位の地上放射線量率の把握を高い精度で可能とするものであり、今後の放射線量率マッピング技術の発展やそれを用いて実施される放射能除染の加速に寄与するものと期待される。

このような研究成果が得られたことは、論文提出者の豊富な学識と優れた研究能力を裏付けるものである。よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和5年9月21日