

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

Estimation of radiation dose on the ground level using 3D inverse distance weighting considering the amount of undulations

○鬼川 凌 大山 勝徳 見越 大樹 西園敏弘
Ryo Kikawa, Katsunori Oyama, Taiju Mikoshi, Toshihiro Nishizono

日本大学
Nihon University

キーワード：放射線量マッピング (radiation dose mapping), 逆距離加重法 (Inverse Distance Weighting), 起伏量 (undulation)

〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 日本大学工学部情報工学科
TEL 024-956-8830 Mail : monchan.sao0122@gmail.com

1. はじめに

無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) は、現在、観測ミッションや偵察ミッション等に応用され、環境解析に適用されている。放射線量マッピングに関する環境解析の分野において、日本原子力開発機構 (JAEA: Japan Atomic Energy Agency) は、おもに 300m の高さから航空機モニタリングを行い、広域の放射線量の推定を行っている。被災後に政府が指示する「避難指示解除準備区域」で放射線量マッピングを行う場合、住宅地区や日常生活圏内を含むことから、計測結果はメートル単位の地上分解能が要求される。しかし、 $1.0\mu\text{Sv}$ の推定誤差がある場合、年間被ばく線量に換算すると 10mSv 以上に相当するため、十分安全ではない。年間被ばく量の累積が 100mSv のときガン死亡のリスクが 0.5% 増加することは国際放射線防護委員会 (ICRP) の調査¹⁾により実証されていることから、住宅地区や日常生活圏内を含む地域では、より推定誤差の少ない補間を行う必要がある。

従来研究²⁾³⁾の放射線量マッピングに用いる 2 次元逆距離加重法 (IDW: Inverse Distance Weighted) は、観測領域の水平距離が数十 km であることに比べると、観測する航空機の高さが 300m より短いため、土地の起

伏量⁴⁾による誤差の影響は相対的に小さいといえる、しかし、地上 100m 以下を飛行する UAV でより高精度の放射線量マッピングを行う場合、従来手法の 2 次元 IDW (IDW) では、平面距離の逆数を重みとした加重平均によって推定値を求めるため、起伏量の影響による推定誤差が無視できなくなる。

本稿では、UAV によって得られた観測データから地表の放射線量を推定する為に、UAV による観測地点の周辺土地に関する起伏量を考慮した 3 次元逆距離加重法の提案を行う。

2. 関連研究

2.1 航空機モニタリング

航空機モニタリングのアプローチは、2012 年に日本原子力開発機構が発表した。フライト方法は 300m の高度で 3km メッシュごとのフライト航程の条件下に基づきヘリコプタ全 14 機を用いた大規模な作業で行なっている。IDW の適用では、空間放射線量の距離減衰率を用いて、上空で収集する観測値からその座標における地上放射線量に換算する。飛行軌跡以外の座標における地上放射線量は欠損するため、IDW を用いて周辺の地上放射線量を補間する。IDW は、処理する

各メッシュの近傍にある観測点の値を平均することによりメッシュの値を推定する方法であり、推定するメッシュの中心に観測点に近いほど、平均化処理への影響、つまり加重が大きくなることで補間方法の中でも二乗平均平方根誤差 (RMSE) が低い補間法である。IDW を用いて周辺の地上放射線量を補間した結果、 $0.2\mu\text{Sv}$ 前後の RMSE を確認している。しかし、航空機モニタリングの場合、測線間隔 1km 以上の計測であり、誤差比較の対象が 1 辺 1km 以上の広大なメッシュ領域であることから、 1km^2 以下の局所地域において放射線量マッピングを行う場合にはさらなる精度とセンシング効率の検証が必要である。

2.2 小型マルチコプターによるアプローチ

一方、小型マルチコプターによる放射線量マッピングの研究⁵⁾では、IDW を用いて 5m メッシュサイズの平面農地の計測において 20% 前後の二乗平均平方根誤差 (RMSE) が確認されている。しかし、森林地帯や山間部などの起伏量の大きい局所領域における推定誤差が十分に考慮されていなかった。すなわち、IDW を用いて上空の UAV から平面の地表の放射線量を推定する場合、上空の UAV を頂点とし対地高度を高さとした直円錐の底面部分に該当する地上の放射線量の平均値となる⁶⁾。これに対し、図 1 の周辺よりも低い土地における地形では、起伏のある箇所の線源からの影響が大きい場合があるため、推定結果の誤差要因となる。この解決のために、本稿では観測点となる UAV の近傍の起伏量を標高データ (DEM: Digital Elevation Model) から算出し、起伏量に関するパラメータを重み係数とする 3 次元距離の逆距離加重を行うことにより、起伏量の大きい箇所における推定結果を考察する。

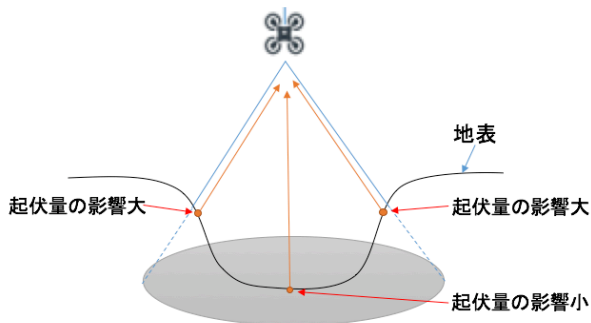


Fig. 1. 起伏量による推定結果の影響

3. 周辺土地の起伏量を考慮した 3次元逆距離加重法

3.1 3次元逆距離加重法

上空から地表の放射線量の推定は、最初に、UAV のある観測点から推定値を求める線源の地点までの直線距離 d における空間放射線量について最小二乗法を用いて、式 (1) の距離減衰率 $f(d)$ の係数 a と係数 b を求める。次に、式 (2) のように地点 \mathbf{u}_i から観測点 \mathbf{s}_j の 3 次元距離に基づく重み w_{ij} を決定する。ここで \mathbf{u}_i は推定値を求める i 番目の地点、 \mathbf{s}_j は j 番目に計測された観測点を表す。

$$f(d) = a \cdot \log d + b \quad (1)$$

$$w_{ij} = \frac{1}{f(\|\mathbf{u}_i - \mathbf{s}_j\|)} \quad (2)$$

3 次元 IDW により求める地上放射線量の推定値 $z'(\mathbf{u}_i)$ は、UAV の対地高度を高さとした直円錐の底面部分の測定値を平均化したものに相当する。図 2 のように、3 次元距離に基づく重み w_{ij} を用いて、地点 \mathbf{u}_i の検索半径内にある観測点 \mathbf{s}_j の観測値 $z(\mathbf{s}_j)$ の加重平均により i 番目の地上放射線量の推定値 $z'(\mathbf{u}_i)$ を求める。

$$z'(\mathbf{u}_i) = \frac{\sum_{j=0}^N w_{ij} \cdot z(\mathbf{s}_j)}{\sum_{j=0}^N w_{ij}} \quad (3)$$

3.2 周辺土地の起伏量による重み付け

UAV の高さから推定値を求める 3 次元逆距離加重を行うために、推定結果の誤差要因となる起伏量を考慮する。最初に、推定値を求める地点 \mathbf{u}_i から検索半径内にある観測点 \mathbf{s}_j の標高差の絶対値を起伏量 e_{ij} とする。式 (4) で起伏量を求めた後、3 次元距離の距離減衰率 $f(d)$ だけでなく、起伏量 e_{ij} を掛け合わせる。ただし、係数 c は起伏量に依存するパラメータのため、実験結果から求める必要がある。

$$e_{ij} = |\text{Elevation}_i - \text{Elevation}_j| \quad (4)$$

$$w'_{ij} = \frac{1}{c \cdot e_{ij} \cdot f(\|\mathbf{u}_i - \mathbf{s}_j\|)} \quad (5)$$

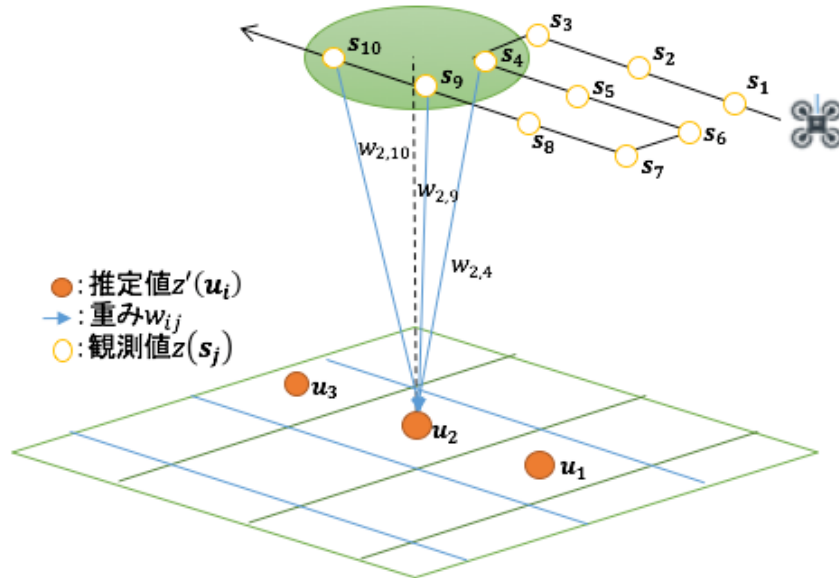


Fig 2. 3次元逆距離加重法

4. 適用事例

本研究では2016年6月に放射線量の観測データを得るために福島県富岡町にて観測を実施した。観測場所は、福島第一原子力発電所の被災地から10km以内の森林に囲まれた住宅地である。

観測データは、図3の観測領域(90m×200m)において、飛行時間20分、測線間隔4m、飛行高度50m、最大風速毎秒2メートル以下の条件で測定したものである。UAVによる観測に使用した放射線量検出機は、MPPC(マルチピクセルフォトカウンタ)のCsI/TIシンチレータであり、線量率の変化後

1秒以内に誤差の20%の観測点を記録する。住宅近くの地上放射線量は平均約 $0.5\mu\text{Sv/h}$ であるのに対し、森林付近は平均約 $1.0\mu\text{Sv/h}$ であった。観測の結果、約1700の観測点を得ることができた本事例においては、得られた観測データに対して以下の分析を行う。

- 1) 従来のIDWと提案手法の3次元IDWの適用結果に関する比較
- 2) 観測領域内における地点Aと地点Bを基点とする起伏量と推定誤差の関係の分析



Fig 3. 観測領域

4.1 3次元 IDW の結果

図4はIDWの適用結果を表す。従来手法では図3で示した地点Aと地点Bが森林に囲まれていることから推定誤差が大きく、特に地点Bは最大誤差約 $0.7\mu\text{Sv}$ の箇所に近い。

IDWによるRMSE $0.38\mu\text{Sv}$ に対して、3次元IDWによるRMSEは $0.26\mu\text{Sv}$ であった。

3次元IDWの結果は、図4のIDWの結果に比べて、多くの地点について誤差が比較的低い。特に、図5の地点Aを含めた平地の誤差が小さく、より実測値に近い値が得られた。地点Bに関して、若干の精度の向上は見られたが、森林に囲まれた道路の精度に対して改善の余地が見られた。地点Bの周辺は5m近い起伏が存在し、結果に影響を及ぼ

したと考えられる。したがって、次節において、起伏量と推定誤差の関係について分析を行った。

4.2 起伏量と推定誤差の関係

観測領域内の地点Aと地点Bについて起伏量と推定誤差分析を行った結果を図6と図7の散布図に表す。

地点Aについて、図6の散布図はUAVの離着陸地点である平地から半径約25m以内の起伏量と推定誤差を表し、約70点の推定結果が得られた。図6の結果から、起伏量が殆どない平地付近においては推定誤差のばらつきが少ないことに対し、起伏量が大きくなるにつれて推定誤差は大きく、かつ、ばら

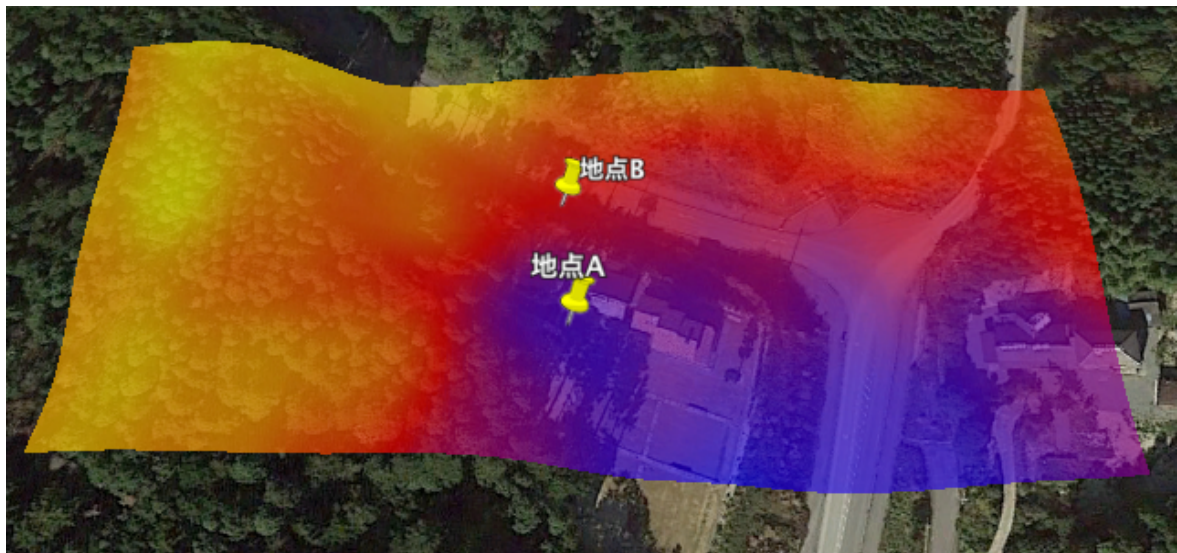


Fig 4. IDW の結果

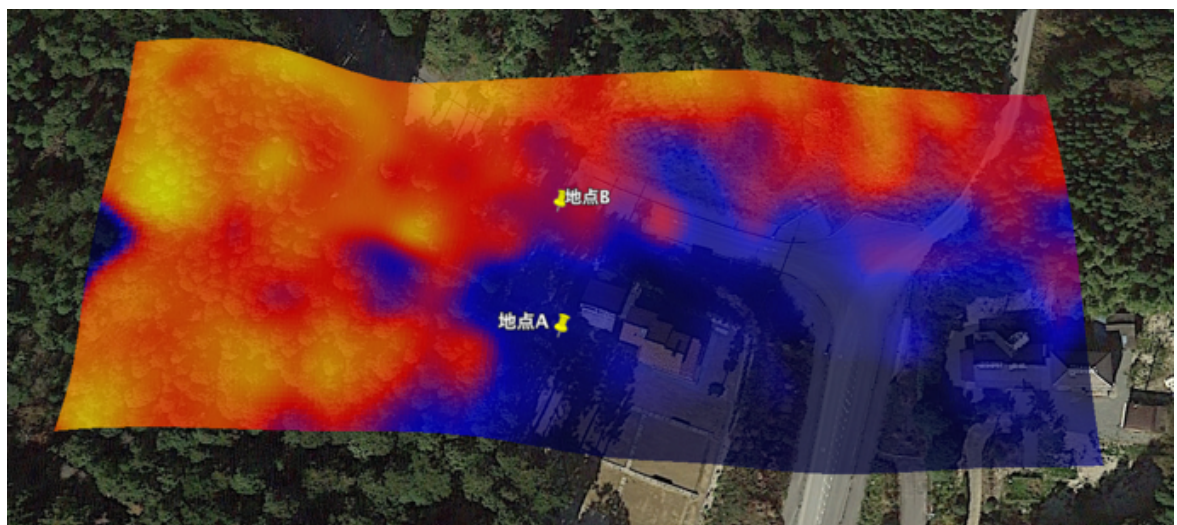


Fig 5. 3次元 IDW の結果

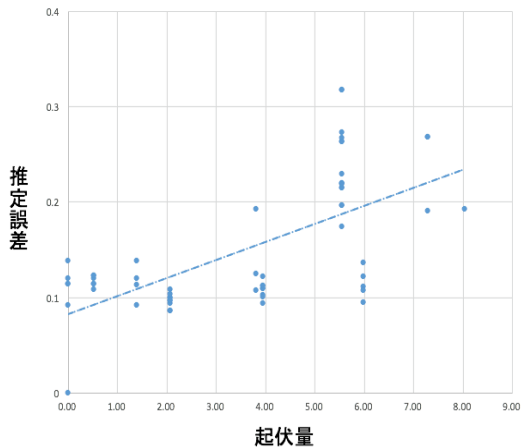


Fig 6 地点 A から 25m 以内の起伏量と推定誤差

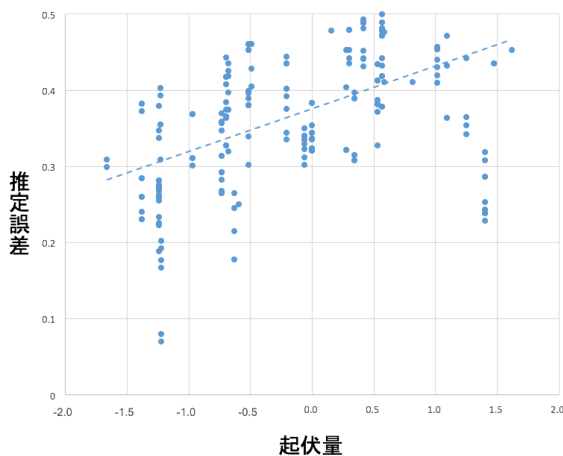


Fig 7. 地点 B から 25m 以内の起伏量と推定誤差

つきもあることがわかった。起伏量と推定誤差の相関分析を行った結果、かなり強い相関 ($r=0.71$) が得られた。

地点 B について、図 7 の散布図は地点 B の平地の箇所から半径約 25m 以内の起伏量と推定誤差の散布図であり、約 230 点のデータが得られた。地点 B から見て起伏量 0 以下の領域は、森林の地点に対応する。対象的に、起伏量 0 以上の領域は、相対的に標高の低い道路に対応する。図 7 の散布図から、森林と道路上でそれぞれ推定誤差のばらつきが異なっていることが確認できる。すなわち、森林付近の推定誤差のばらつきは起伏量に関係なく比較的一様な分布であるのに対し、道路上の推定誤差のばらつきは起伏量が大きくなるにつれて大きい。起伏量と推定誤差の相関分析を行った結果、比較的強い相関 ($r=0.51$) が得られた。

4.3 考察

実験の結果、UAV 観測によって得られた観測データを用いて 3 次元 IDW の提案を行い、起伏量と推定誤差の関係に対して分析を行

った。分析の結果から提案手法である 3 次元 IDW は従来手法に比べ推定精度が高いことがわかった。これは従来手法が平面的なユークリッド距離を用いて重み付けを行っているのに対し、提案手法では UAV のある観測点から推定値を求める線源の地点までの 3 次元距離を用いて重み付けをしたことにより高度差が考慮されたためであると考えられる。ただし、推定誤差の大きかった地点 A と地点 B を用いて起伏量と推定誤差の関係を分析した結果、起伏量が推定誤差に与える影響があることがわかった。

今後の課題として、提案した周辺土地の起伏量による重み付けに関する係数 c に対して起伏量に対して適切なパラメータを決定し、3 次元 IDW と周辺土地の起伏量を考慮した 3 次元 IDW の比較を行う。本稿において提案した周辺土地の起伏量による重み付けを調整するための係数 c について、まだ適切なパラメータを決定していない。小型マルチコプターによる航空機モニタリングの実験では、観測範囲内に起伏が存在すると、推定誤差に影響が見られた。そのため今後、実験結果に基づいて 3 次元逆距離加重法に対し起伏量を考慮した重み付けの結果について、推定精度をさらに検証する必要がある。

謝辞

本研究は精密測定技術振興財団の助成を受けたものです。

【参考文献】

- 1) 国際放射線防護委員会. "国際放射線防護委員会の 2007 年勧告 - ICRP", pp.16-19 (2009).
- 2) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 近藤敦哉, 志風義明, 高橋晶樹, 石田睦司, 西澤幸康, 卜部嘉. "鳥居建男, & 眞田幸尚. (2012). 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査", JAEA-Technology, 36 (2012).
- 3) 眞田 幸尚. "無人機を用いた放射線モニタリング技術の開発", 日本原子力研究開発機構福島研究開発部門 福島環境安全センター (2015).
- 4) 吉田純子, 阿子島功. "山地の中縮尺地形分類図に用いる起伏量と谷密度", 東北地理, 38(4), 317-326 (1986).
- 5) 大山勝徳, 中村和樹, 若林裕之. "UAV モニタリングによる 3 次元放射線量分布と観測網羅率の可視化", 第 292 回計測自動制御学会東北支部研究集会, 292-8 (2014).
- 6) 鳥居建男, 眞田幸尚. "空からの遠隔放射線モニタリング", 放射性物質対策技術, pp.213-221 (2015).