

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

Visualization of 3D Distribution of Radiation Dose and Observation Coverage for UAV Monitoring

大山勝徳, 中村和樹, 若林裕之

Katsunori Oyama, Kazuki Nakamura, Hiroyuki Wakabayashi

日本大学

Nihon University

キーワード: 無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle), 空間統計 (spatial statistics), 放射線量分布 (distribution of radiation dose), 観測網羅率 (observation coverage) .

連絡先: 〒 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 大山勝徳, Tel.: (0024)956-8830, Fax.: (0024)956-8830, E-mail: oyama@cs.ce.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

無人航空機 (UAV) による観測の実用性が向上しつつある中で, より広い観測範囲で効率的にデータを採取することが求められている. 特に, 災害の影響を受ける地域の観測においては, 信頼性のあるデータをいち早く得ることが関心ごととなる.

例えば, 原子力規制委員会により実施された有人航空機による放射線量分布の観測は, 地上 300m 付近で放射線量分布の計測を行うアプローチである¹⁾. このアプローチの場合, 広域地図の生成に効果を発揮する代わりに, 軌跡幅 (メッシュサイズに相当) が約 1.85km のため, 居住区付近の安全性調査や除染活動に適する地図解像度までは得られない. それだけではなく, 航空機を用いるアプローチにおいて, 地形差による放射線量分布の不均一性や最大飛行時間によ

るサンプルデータの点数の制約などにより, 一定の信頼性を満たすデータの得られる観測範囲には限界がある. すなわち, 有人航空機や小型 UAV によるモニタリングの結果, サンプルデータの点数が不足する箇所とその反対に極端に観測時間を費やした箇所の分布に偏りが生じる場合もありうる. サンプルデータの点数の充足率を迅速に把握できない場合, 除染作業の意思決定の効率に影響を与えることもありうる.

本発表では, 小型 UAV に搭載した放射線モニターによって取得できる 3 次元放射線量分布から地上高さ 1m の放射線量分布を推定する本研究のアプローチを紹介し, 次に, 観測範囲内において一定誤差以内の推定結果となった格子点の数の割合を観測網羅率と呼び, その分布の可視化についてその実現性を考察する.

2. 空間放射線量から地表の放射線量分布のマッピング

空間放射線量から地表(地上高さ $1m$)の放射線量分布をマッピングする方法は,おもに GPS データの各グリッド座標において, ^{137}Cs の崩壊を対象とする距離減衰率の計算と隣接する各グリッド座標における放射線量の推定値の内挿を要する.

詳しい計測方法や計算手法については,例えば, IAEA の方法²⁾ が示されている. 日本原子力研究開発機構は, IAEA の方法に基づいて航空機モニタリングの結果を評価し,放射線量分布の地図を最大 30% 程度の不確かさ(推定結果の誤差)で作成している¹⁾. ただし,この場合の評価方法は約 $1.85km$ のメッシュを 1 つの観測点とする実測値との比較であることから,作成された放射線量分布の解像度に限界がある.

本研究は, UAV モニタリングによって農地や森林地帯のように複数の地形が混在する箇所の放射線量分布を観測可能とすることに焦点を合わせ,地表の放射線量の推定式を選択して地図の描画を行ってきた^{3) 4)}. 地形差を考慮し,標高と土地被覆の測定結果を統合して地表の放射線量分布の推定を行った結果,平地と森林の地形差のある観測地に限って 5% 付近の精度改善の見込みを得たため,地形条件を増やして検証を続けている.

以下, UAV モニタリングによる放射線量分布のマッピングに必要な距離減衰率と推定値を内挿する方法を考察する.

2.1 距離減衰率の決定

GPS データの各グリッド座標における上空から地表の放射線量の推定には, ^{137}Cs の崩壊を対象とする空間の距離減衰率を必要とする. ただし,実際には,距離減衰率は大気条件と地理条件(点線源と面線源の組み合わせや線源の密度)の要因により計算方法が異なる⁶⁾⁷⁾. IAEA

の方法は,自然対数による近似式を距離減衰率の計算に用いる. 本研究はそれに対し,実際の観測地点付近のサンプルデータに基づいて,地形条件に合わせて係数の選択を行う.

本研究では,おもに自然対数による近似式の比較を繰り返してきた. 観測地点付近のサンプルデータがその都度得られる場合,高さや空間の放射線量のデータ集合から最小二乗法を用いて係数 a と係数 b を求めることにより,下式の高さ h における距離減衰率 $r(h)$ を決定することができる.

$$r(h) = a \cdot \log h + b \quad (1)$$

以上のアプローチは,相関係数について $|R| > 0.5$ となるまで,サンプルデータを採取することがおもな前提となる. これまでの経験上,空間線量 $1\mu Sv/h$ 以上の地域において,平地でならかな対数曲線の近似式となるのに対し,森林地帯の地上 $20m$ 付近では比較的急な勾配の曲線の近似式となる傾向が見られている⁴⁾.

2.2 補間法

UAV モニタリングで測定した空間放射線量は,無指向性の計測器である場合,おもに UAV 下部の地表面からの高さを半径とする円内の測定値を平均化したものに相当する. しかし, UAV の軌道(緯度と経度からなる GPS グリッド座標)から水平方向に大きく外れた地表については観測対象として網羅できるとは限らない. そのため,そのような地表の観測点の推定値を内挿する必要がある.

補完法には,クリギング法や逆距離加重法(Inverse Distance Weighting)などがある. 一般的にクリギング法は高度な推定法である代わりに,最適な推定方法を選択する前に, Z 値によって表される現象の空間的な振る舞いを徹底的に調査する必要があり,設定値の選択によって結果が大きく外れる可能性が高いことが知られて

いる¹⁾。一方，UAV モニタリングの測定点は規則的であるため，逆距離加重法を用いた場合，必要最小限のパラメータを用いて十分に正確な分布で推定結果が得られる。そのため，逆距離加重法は，実用性と正確性の両方面で UAV モニタリングの観測データの解析に適している。

逆距離加重法は，各グリッド座標上の推定値（空間放射線量からマッピングされた地表の放射線量）について，以下のように隣接するグリッド上の推定値に距離の逆数で重み付けを行う。

$$p(x) = \frac{\sum_{i=0}^N w_i(x) \cdot p(x_i)}{\sum_{j=0}^N w_j(x)} \quad (2)$$

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (3)$$

すなわち，対象点 x について，周辺にある N 点分の $x_i (i = 0, 1, \dots, N)$ の距離の逆数を重みとした加重平均から推定値 $p(x)$ を求める。このときの $w_i(x)$ の $d(x, x_i)$ は距離を表し， p は次数を表す。UAV モニタリングで測定する場合， p を 2 とした場合に最適な推定値となることが多い。

3. 観測網羅率の可視化

UAV モニタリングにおいて観測結果は，サンプルデータの点数が不足する箇所とその反対に極端に観測時間を費やした箇所の分布に偏りが生じる場合がありうる。例えば，不十分なサンプルデータの点数により，測定値のホットスポットらしき箇所が見られたとしても，その境界が曖昧である場合とホットスポットの大きさによっては観測データとして採取できない場合がある。またこのとき，サンプルデータの点数の充足性に関する基準がなければ，データ信頼性の低い観測結果の範囲を把握せずに観測後の意思決定を強いられることになる。

本発表では，GPS データの各グリッド座標を中心とする観測範囲（メッシュ）内において，一定誤差以内の推定結果となった格子点の数の割

合を観測網羅率と呼ぶ。同じような概念は，モバイル端末利用者の人口統計を目的とするモバイル空間統計の信頼性評価⁵⁾において，偏差率（推定値と実測値のずれ）として議論されている。本研究における観測網羅率は，Fig.1 のように，UAV のウェイポイントルートに関する意思決定を支援する目的から，目標精度を満たした観測結果の広がりを可視化することに用いる評価指標である。

最初に，各グリッド座標 x を中心とするメッシュ内サンプルデータについて，式(4)のように，推定値（空間放射線量からマッピングされた地表の放射線量）の二乗平均誤差（RMSE: Root-Mean-Square Error）を求める。

$$e(x) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (p_0(x) - p_i(x))^2} \quad (4)$$

ここで， $p_0(x)$ は地表で計測した実測値（実測値が得られない場合，推定結果の平均値）， $p_i(x) (i = 1, 2, \dots, M)$ は同じグリッド座標 x のメッシュ内サンプルデータにおける i 番目の推定値を表す。以上に基づく観測網羅率 c は，指定した M 個のグリッド座標全てにおける目標精度の二乗平均誤差 e と推定値の二乗平均誤差 $e(x)$ の比を表す。

$$c = \frac{e \cdot N}{\sum_{x=1}^N e(x)} \quad (5)$$

$c \geq 1$ の場合，目標精度以上の推定値を満たすことから，指定した N 個のグリッド座標のメッシュ内において観測が網羅されたことを表す。

4. 事例

本事例における観測網羅率は，福島県内の農地（2012年3月）の観測データを選択し，地表の放射線量の推定値と実測値の比較によって計算した結果である。UAV モニタリングにより，地表から約 30m の高さにかけて，UAV 搭載の CsI (TI) シンチレーターを用いて 1 秒ずつ計

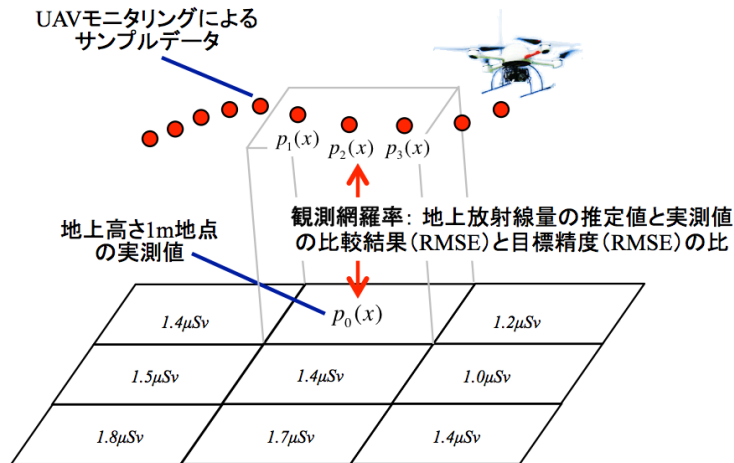


Fig. 1 観測網羅率の考え方.

測した結果、合計で約 3000 点のサンプルデータが得られた。

4.1 地上放射線量の推定値と実測値

Fig.2 にある目印は、地上放射線量の実測値を計測した位置を表し、地上から高さ 1m の各地点について、1 分間の平均値を記録することによって得られた。今回の事例では、侵入の困難な箇所が含まれたため、おもに農道と畦道のラインに沿った位置について重点的に計測が行われた。

一方の Fig.3 は、空間放射線量から地表の放射線量分布のマッピングにより得られた地上放射線量の推定値の分布を表す。特に Fig.3 の中で、北東（図の右上側）に放射線量の高い箇所と低い箇所の起伏が見られる。黄色（比較的明るい色）のメッシュは放射線量の高い箇所を表し、青色（比較的暗い色）のメッシュは放射線量の低い箇所を表す。この地域で周囲平均 $1.40\mu Sv$ の地上放射線量の実測値が得られたのに対し、農地には耕して土を掘り返された箇所がある。耕作済みの箇所について、約 $0.80\mu Sv$ の比較的低い実測値が得られている。対照的に、未耕作の箇所（果樹園）の周辺について、約 $2.00\mu Sv$ 以上の実測値が得られている。

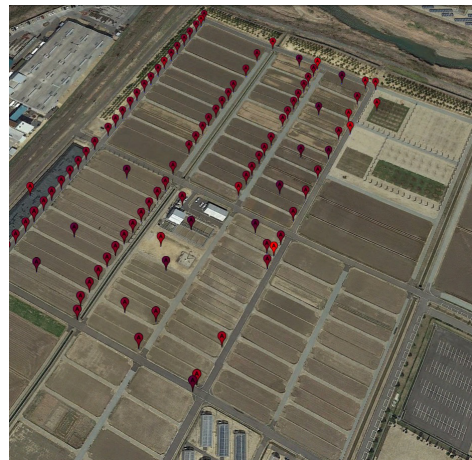


Fig. 2 実測値を得るための観測点.

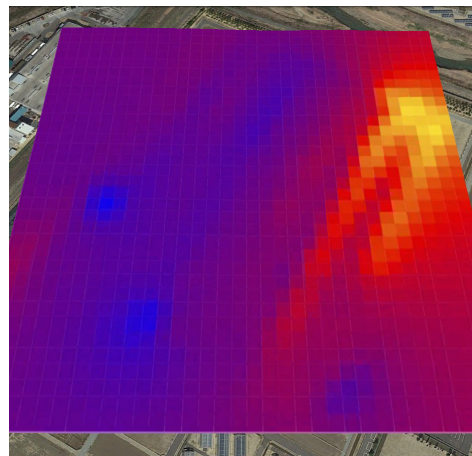


Fig. 3 各グリッド座標上の推定値の分布.



Fig. 4 各グリッド座標上の推定値と実測値の比較から得られる二乗平均誤差.

4.2 観測網羅率の計算

Fig.4 は、Fig.3 の北東の箇所にて地上放射線量の推定値と実測値を比較した結果、各グリッド座標上の $e(x)$ の値を表示したものであり、各メッシュの1辺を $10m$ としたとき、 $e(x)$ の値が得られた地点は17箇所あった。目標精度の二乗平均誤差を $0.20\mu Sv$ ($e = 0.20$) とした場合、耕作済みの農地 (Fig.4 中央) と未耕作の箇所 (Fig.4 右側) の間に、 $e(x) \geq 0.20$ 以上である箇所が多い。すなわち、この地域においてサンプルデータの点数が不足している箇所は、耕作済みの農地と未耕作の箇所の間に分布している。

計17箇所 (160個のサンプルデータ) の $e(x)$ の値は、平均 $0.24\mu Sv$ であり、言いかえると、 $\pm 0.24\mu Sv$ の標準誤差で推定値を得ることができることを表している。以上の観測範囲において、観測網羅率は 0.83 ($c = 0.83$) である。 $c < 1.00$ であることから、目標精度に対しサンプルデータの点数が少し不足していることが分かる。

5. まとめと今後の課題

本発表では、農地や森林地帯の地形において UAV モニタリングによって収集される空間放射線量分布のサンプルデータから地上高さ $1m$ の放射線量分布をマッピングする方法を紹介し、さらに、事例を用いて観測網羅率を計算することにより、サンプルデータの点数が不足している箇所を特定可能であることを考察した。ただし、この方法は各グリッド座標上の推定値と実測値が現地で得られることを前提としているため、検証のために多点の比較結果を要する。観測網羅率の分布について地図作成の自動化が進むことによって、より広い観測範囲の比較検証も可能となる。

今後の課題として、観測網羅率に関する地図作成の完全自動化の後、より広い面積かつ多くの地形を含む観測点について評価を行う必要がある。さらなる観測範囲の網羅性を実現するためには、1台の UAV だけでなく、複数の UAV と地上ロボットを同時に連携稼働させることは、現地でスピーディに放射線量分布のマッピングを行う上で重要な課題である。その延長線上として、計測手段とデータ形式の種類に関して柔軟なユーザインタフェースを提供するモバイル通信モニタリングシステムを提案していきたい。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会. 避難指示区域における航空機モニタリングの測定結果について. http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/8000/7480/24/362_0513_11.pdf.
- 2) International Atomic Energy Agency (IAEA). Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
- 3) K. Oyama, H. Wakabayashi, A. Takeuchi and N. Ishitsuka. Integration of 3D Trajectory Maps into a Local Distribution Map of Radiation Dose Using Unmanned Aerial Vehicle. Proceedings of 7th IEEE International Workshop on Engineering Semantic Agent Systems (ESAS), pp.607-612, 2012.

- 4) K. Oyama, K. Nakamura, H. Wakabayashi, A. Takeuchi and N. Ishitsuka. Situational Map Integration of Dose Distribution on the Ground Surface using Unmanned Aerial Vehicles. In Proceedings of 2013 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), pp.171-174, 2013.
- 5) 大藪勇輝, 寺田雅之, 山口高康. モバイル空間統計の信頼性評価 (社会・産業の発展を支える「モバイル空間統計」: モバイルネットワークの統計情報に基づく人口推計技術とその活用), NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, 電気通信協会, vol.20(3), pp.17-23, 2012.
- 6) 斎藤公明. 周辺地域の汚染状況に関する詳細調査. 保健物理, vol.46(3), pp.210-214, 2011.
- 7) 田崎晴明, ベクレルからシーベルトへ, <http://www.gakushuin.ac.jp/~881791/housha/docs/BqToSv.pdf>.