

論文の内容の要旨

論文題目 衛星光学センサによる数値標高モデルのノイズ低減手法

氏 名 高久 淳一

地形データは、地図における基本データの一つであり、古くは地図上の等高線として表現されてきた。近年、それらは電子化されたデータとして扱われ、地図の作成・更新はもとより、地理情報システムにおける基盤データとして、交通・電波・送電・ダムなどの国土利用計画、洪水・土砂崩れなどの災害監視、森林体積・氷河融解・掘削などの環境監視、石油・水などの資源探査、など幅広い分野で利用されている。地形データの中でも地上の等間隔グリッドにおける標高値として数値化されたラスター型の数値標高モデル **Digital Elevation Model (DEM)** は、その汎用性・応用性の高さから主に先進国の間で整備が進められてきたが、国を跨ぐような広域の事象や地球環境のような全球スケールの問題を扱う場合は、エリアによるデータ抜けが少なく、精度・品質が均一なグローバル **DEM** データの整備が必要となる。この解決策の一つとして、近年、衛星リモートセンシングによる **DEM** (衛星 **DEM**) 作成の研究が進められてきた。しかしながら、衛星 **DEM** は、その観測機器仕様やデータ処理手法の違いに依存したデータの精度や品質の知見が未だ不十分であり、より詳細な解析が求められている。

DEM 作成を主要なミッションの一つとしてこれまでに打ち上げられた衛星搭載のセンサは、複数の光学センサを用いて常時ステレオ観測を行うアロングトラックステレオによるものと、一組のバイスタティックレーダーアンテナを用いて **Synthetic Aperture Radar (SAR)** 画像ペアを常時取得する干渉 **SAR** によるものの2種類に分類されるが、センサ機器の実装の容易さから光学センサによるミッションがレーダーに比して多くなっている。光学センサによる **DEM** は、ステレオ視による三次元座標推定により作成されるが、その精度は、大きくシステムノイズとランダムノイズの2つのノイズ(誤差)に依存する。システムノイズは、主にセンサモデル、衛星位置、衛星姿勢といった観測システムに係る幾何情報の誤差に由来するものであり、特に衛星姿勢の振動(ジッタ)計測誤差に伴う **DEM** の周期ノイズが問題となることが先行研究においても示されている。一方、ランダムノイズは、ステレオ画像マッチングのランダム誤差が、画像の地上解像度に伴って **DEM** の高さ誤差に寄与して発生し

ていることが同様に先行研究から示されており衛星光学センサによる DEM の共通課題となっている。

本研究では、これらグローバル DEM 作成ミッションにおいて利用されている衛星搭載光学センサ由来の DEM データについて、そのシステムノイズおよびランダムノイズの特性を明らかにし、それらを低減する手法に係る研究を行った。本研究の要点は以下のようにまとめることができる。

- 衛星の姿勢振動に伴う DEM のシステムノイズについて解析を行いその低減手法を開発した。
- 画像マッチングに伴う DEM のランダムノイズについて解析を行いその低減手法を開発した。
- 手法の適用対象データとしては、光学衛星由来の DEM において現状比較的高い精度・解像度を持つ ALOS 衛星搭載の光学センサ PRISM による DEM を使用した。
- 次世代衛星によるより高解像度・高精度な DEM について、上記ランダムノイズ手法の適用の効果を確認した。

DEM データのノイズ解析は、まず姿勢振動によるシステムノイズの検知を目的として、全球の一定範囲における PRISM のステレオ画像データから DEM を作成し、目視でノイズの有無を判定してその発生傾向の確認を行った。結果として、PRISM から作成した DEM には衛星進行方向に沿って約 7 Hz, 60 Hz のそれぞれ周波数をもつ 2 種類のジッタノイズ（低周波ジッタ、高周波ジッタ）が発生していることを確認した。

DEM の低周波ジッタについては、標準姿勢データである 10 Hz サンプリングの計測値に代えてより高周波な計測値である 675 Hz サンプリングの高周波姿勢データを適用することでほぼ修正できること示されたが、16 %程度の割合で十分に補正できないケースがあることが確認された。姿勢データ計測値と DEM に残留している低周波ジッタとの関係を解析したところ、高周波姿勢データの計測に用いている加速度センサ（Angular Displacement Sensor: ADS）の周波数応答特性、或いは衛星上の ADS センサ取り付け位置とセンサ光軸との間の振動の伝搬特性に不確定性があり、何らかの条件により DEM の低周波ジッタに該当する帯域にて姿勢計測値の誤差が発生していることが原因と推定された。よって、高周波姿勢データから DEM の低周波ジッタに該当する帯域をフィルタした姿勢データを用いて作成した DEM と、オリジナルの高周波姿勢データを用いて作成した DEM とのそれぞれ低周波ジッタの振動特性を比較し、これを基に上記 ADS の低周波ジッタに該当する帯域の応答特性を補正する手法を開発した。応答特性を補正した高周波姿勢データを用いて作成した DEM では、低周波ジッタが正常に補正されていることを FFT スペクトルにて確認した。すなわち、衛星光学センサの姿勢データ計測値に応答特性などがあり、それを適用して作成した DEM においてジッタノイズが正常に修正できない場合でも、逆にその作成 DEM におけるジッタ

ノイズの傾向を解析することで、姿勢データ計測値の応答特性が推定可能であることを示した。本手法は光学衛星センサ由来の DEM におけるシステムノイズの除去のみならず、打ち上げ前の地上試験での計測が困難な姿勢ジッタおよびその計測値の軌道上における特性を解析する上でも有効であると思われる。

一方、DEM の高周波ジッタについては、高周波姿勢データの適用が無効であり、且つ低周波ジッタの場合に適用した応答特性の補正も、原理的に難しいことが示された。よって、高周波ジッタに対しては、光学衛星センサに発生している比較的高周波且つ姿勢計測値が適用できないジッタノイズを除去するための新たな手法として、フィルタによる除去を検討した。フィルタとしては、本件のようなノイズの特性が空間位置によって変化するデータに適するとされる離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transform: DWT) による手法を用いた。DWT によるフィルタの適用に当たっては、ウェーブレット関数の選択、およびフィルタの閾値の決定について検討を行い、光学センサの DEM に発生する姿勢ジッタ由来のシステムノイズが軌道方向に沿った垂直成分に沿ってのみ現れる性質を利用して、DWT フィルタ中で使用する 2 次元多重解像度解析の水平・垂直成分の差異を指標に用いる手法を提案した。PRISM の DEM に発生している高周波ジッタに対して上記 DWT フィルタを適用し、その効果を局所的な FFT スペクトルにより定量評価した。なお、姿勢データの高度な計測精度を要する光学衛星の DEM 作成ミッションにおいては、今後も比較的高周波且つ姿勢データが無効なジッタノイズが発生するケースが十分に考えられ、本研究に示したような解析および後処理の適用が有効であると思われる。

次いで、マッチングに伴う DEM のランダムノイズについて PRISM から作成した DEM をサンプルとして評価を行った。結果として、2.5 m の地上解像度を持つステレオ画像から作成した DEM のランダムノイズに伴う高さ誤差は 3~4 m (σ) 程度と推定され、画像解像度の約 2 倍といった標準的な指標より僅かに良い結果となっていることが判った。一方、本ノイズは、ステレオ画像マッチングの画像解像度に沿った精度限界に伴うものと考えられ、更なる高精度化のためには後処理によるノイズ低減が必須となる。よって、これらノイズを効率的に除去するフィルタ手法として、ノンローカルフィルタを適用する新たな適応的フィルタ手法を提案した。フィルタのパラメータについては、対象とする画像および DEM の特徴に沿って推定するモデルを適用した。提案手法の評価としては、DEM のフィルタ適用前後の目視確認による定性評価のほか、参照 DEM を用いた定量評価を行い、高さ誤差が 3~4 m (σ) から 1~2 m (σ) 程度と約 1/2 ~ 1/3 にまで低減できることを示した。また、他の一般或いは類似する適応的フィルタ手法との比較検証を行い、提案手法の優位性を確認した。

最後に、将来の光学衛星ミッションで作成されるより高解像度な DEM 作成のシミュレーションを行い、上記ランダムノイズ低減のための提案フィルタ適用の有効性・汎用性および将来性について確認した。作成した DEM は、その基となるステレオ画像シミュレーションに使用した航空機観測画像のラジオメトリック的な制約によりやや想定より誤差の大きいデータとなったが、フィルタによる効果を期待した比較的平坦なエリアのランダムノイズ

について、PRISMによるDEMの場合と同様に高さ誤差の標準偏差にて1 mを超える低減が可能であることが確認できた。また、仮にミッションの制約により直下視センサに対してステレオ視を行う斜め視センサの地上解像度を落とした構成とした場合に生じるDEMの精度低下に対しても、平坦域における低下の幅を低減できることが示された。