TerraSAR 反射強度画像のスペックルノイズの低減効果の評価

Evaluation of Speckle Noise Reduction of TerraSAR Intensity Imagery

朱 林*・趙 憶*・望月貫一郎*

Lin ZHU, Yi ZHAO and Kan-ichiro MOCHIZUKI

Abstract : In this study, the effect of speckle noise reduction was evaluated with high resolution satellite TerraSAR intensity data. Multi-temporal polarization imagery (HH & VV) was acquired on different growth stages of rice plant. Three kinds of filters, i.e. Lee, Frost, Gamma Map, were applied for speckle noise filtering with different window sizes. Six indices, i.e. Standard deviation, Equivalent number of looks, Speckle suppression index, Edge preservation index, Image sharpness, and Image detail preservation index, were used in order to compare and assess the effect of speckle noise reduction of different filters. Based on the evaluation results, the most appropriate window size was determined for speckle noise filtering of utilized data.

1. はじめに

近年、農業モートセンシング分野における高分解能合成開口レーダ SAR (Synthetic Aperture Radar) の利活用に関する研究が進められている (Moran et al., 2012, Cable et al., 2014, Hong et al., 2015)。光学センサに比べ、SAR はより波長の長いマイクロ波帯の電磁波を利用して、天候や昼夜を問わず地表面の観測ができるのが特徴である。また、高空間分解能 SAR を利用することによって、より詳細に地表面の情報を取得することが可能となっている。これは、農作物の生育状況のモニタリングなど定期的に観測データを取得する必要となる場合、非常に大きな利点である。そのため、農業分野における高分解能 SAR の利活用が、農作業の管理、作付け状況の把握、および、作物生産量の予測など有望な情報収集手段として期待されている。

いっぽう、高分解能 SAR を利用して、農作物に関する詳細な情報を取得する場合、SAR データのスペックルノイズの低減が非常に重要である。なぜならば、

SAR 特有の画像形成メカニズムによって生成された画像の中に常にゴマ塩状のようなランダムな濃度のゆらぎが存在し、正確な画像データ解析に影響を与える。特に、圃場データが存在しない、または入手できない場合、SAR データの解析は、圃場単位ではなく、光学センサのように画素ごとの処理を行うことになる。また、同じ圃場においても、農作物の生育にはばらつきが存在するため、より詳細に作物の生育状況を把握するには、スペックルノイズの低減が必要不可欠である。スペックルノイズは、位相が互いにランダムに異なる散乱波が多数重なり合って生じたもののため、原理的に避けられないことになっている。農作物の生育状況のモニタリングにおいては、このスペックルノイズを低減することは、正確な農作物の後方散乱特性を知るための重要な処理ステップの一つである。SAR のスペックルノイズ低減について、これまで、多くの研究が行われていた (Huang and Genderen, 1996, Xiao et al., 2003, Qiu et al., 2004)。しかし、高分解能 SAR を利用して、農作物を対象としたスペックルノイズの低減について、まだ十分に研究されているとは言い難いのが実情である。

そこで、SAR による水稻の生育状況のモニタリングを目的として、スペックルノイズの多い SAR データを光学センサのような画素ごとの処理に利用する条件

*株式会社パスコ

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 54, NO. 4, 2015

を求めるために、高空間分解能衛星 TerraSAR (以降: TSX) が取得した 4 時期の HH 偏波と VV 偏波の反射強度画像を用いて、スペックルノイズの低減効果を評価した。まず、Lee, Frost, Gamma Map の 3 種類のフィルタを用いて、異なるウィンドウサイズによるフィルタリング処理を行った。次に、標準偏差、有効ルック数、スペックルノイズの圧縮指数、エッジ保持指数、画像鮮明度および細部保持指数の 6 つの評価指標を用いて、異なるフィルタのスペックルノイズの低減効果を比較・評価した。最後に、異なるウィンドウサイズのスペックルノイズ低減効果の評価結果に基づき、最適なウィンドウサイズを選択した。

2. 使用フィルタ

TSX の反射強度画像のフィルタリング処理は、Lee, Frost, Gamma Map の 3 種類のフィルタを利用する。その理由は、これら 3 種類のフィルタが、1980 年代～90 年代にかけて提案された代表的なスペックルノイズ低減処理フィルタであるためである。しかしながら、当時は低・中分解能の SAR 画像を対象としていたため、新たに登場した高分解能 SAR 画像への適用性を検討する必要がある。また、これら 3 種類のフィルタはいずれも、スペックルノイズのような信号レベルに依存するノイズである、いわゆる乗法ノイズに対する低減効果が期待できるフィルタであり、本研究が対象とする TSX 反射強度画像のノイズ低減処理に適している。さらに、市販されている多くの解析用ソフトウェアにこれらのフィルタの処理機能が搭載されており、簡便に利用可能であることも理由の一つである。以下に、Lee, Frost, Gamma Map の 3 種類のフィルタの特徴を示す。

(1) Lee フィルタ

Lee フィルタは、フィルタウィンドウ内のローカル統計量を用いる手法である。画像のエッジ部を保持しながら、スペックルノイズを低減できる (Lee, 1981)。

(2) Frost フィルタ

Frost フィルタは、個々のフィルタウィンドウ内のローカル統計量を用いて、対象画素までの距離によって指数関数で重み付けされたフィルタリング処理を行うことにより、スペックルノイズを低減する手法である。画像のローカル統計量に応じてフィルタのカーネルも異なるため、エッジを保持しながらノイズを低減

できる (Frost et al., 1982)。

(3) Gamma Map フィルタ

スペックルノイズがガンマ分布に従うと仮定し、対象画素のフィルタリング処理後の値を推定し、スペックルノイズの低減処理を行う。画像を現実の状態に近づけさせながらノイズを低減する効果がある (Lopes et al., 1990)。

また、反射強度画像のフィルタリング処理を行う際に、ウィンドウサイズの設定が必要となる。ウィンドウサイズは、フィルタリング処理の重要なパラメータであり、SAR データのスペックルノイズの低減結果に大きな影響を与える。フィルタリング処理は、対象画素だけではなく、その画素を中心とした周辺領域の画素情報を利用する。対象画素はスペックルノイズである場合、その周辺領域内の画素全体の統計量、ならびに対象画素と周辺画素の違いなどを利用して、ノイズの影響を低減した対象画素の値を求めることが可能である。そのため、周辺領域の範囲を決めるウィンドウサイズの設定によって、利用する画素の情報が異なり、スペックルノイズの低減結果も変わる可能性がある。ウィンドウサイズの選定は、現在、定量的な方法が無く、使用する画像の解像度及び解析目的を考慮し、スペックルノイズの低減効果を評価して行う必要がある。本研究では、ウィンドウサイズを段階的に変えながら、フィルタリング処理した結果を評価して最適なウィンドウサイズを選定する。

3. スペックルノイズ低減効果の評価指標

TSX の反射強度画像に対する Lee, Frost, Gamma Map のフィルタリング処理結果は、表 1 に示された 6 つの指標を用いて評価した。

評価指標 1～3 の標準偏差、有効ルック数、および、スペックルノイズの圧縮指数は、それぞれ各フィルタのノイズ低減効果を評価する指数である。フィルタリング処理後の画像の標準偏差が小さいほど、データの散らばりの度合いが小さいことを示し、該当のフィルタのノイズ低減効果がより強いことを意味する。反対に低減効果が弱いことを表す。有効ルック数は、SAR 画像の平均化処理の度合いを示す指標である。有効ルック数が高いほど、ノイズ低減効果がより強いことを意味する。また、スペックルノイズの圧縮指数は、ノイズ低減処理前後の画像平均値と標準偏差の違いよ

表1 反射強度画像のスペックルノイズ低減効果の評価指標

	評価指標	値の範囲と意味
1	標準偏差 (Standard Deviation: SD) $\sigma = \sqrt{\frac{1}{KL} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L (p(i, j) - m)^2}$ K, L は画像の行数と列数, $p(i, j)$ は i 行, j 列の画素値, m は平均値である。	> 0 値が大きいほど, ノイズ低減効果が弱い
2	有効ルック数 (Equivalent Number of Looks: ENL) $ENL = m/\sigma$	> 0 値が大きいほど, ノイズ低減効果が強い
3	スペックルノイズの圧縮指数 (Speckle Suppression Index: SSI) $SSI = m_o/\sigma_o \times \sigma_s/m_s$ m_o, σ_o は処理前, m_s, σ_s は処理後の平均値と標準偏差である。	$0 \sim 1$ 値が小さいほど, ノイズ低減効果が強い
4	エッジ保持指数 (Edge Preservation Index: EPI) $EPI = \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L (P_s(i, j) - P_s(i+1, j) + P_s(i, j) - P_s(i, j+1))}{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L (P_o(i, j) - P_o(i+1, j) + P_o(i, j) - P_o(i, j+1))}$ $P_o,$ は処理前, P_s は処理後の画素値である。	$0 \sim 1$ 値が大きいほど, 画質保持力が強い
5	画像鮮明度 (Image Sharpness: IS) $IS = \frac{1}{KL} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L (P(i, j) - P(i+1, j) ^2 + P(i, j) - P(i, j+1) ^2)$	> 0 値が大きいほど, 画質保持力が強い
6	細部保持指数 (Image Detail Preservation Index: IDPI) $IDPI = \frac{\frac{1}{KL} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L [(P_s(i, j) - m_s)(P_o(i, j) - m_o)]}{\sigma_s \sigma_o}$	$0 \sim 1$ 値が大きいほど, 画質保持力が強い

り、ノイズ低減効果の評価する指標である。ノイズの圧縮指数が低いほど、該当のフィルタのノイズ低減効果がより強いことを意味する。

評価指標4～6は、スペックルノイズ低減処理後の画像の画質を評価する指数である。一般的に、画像の画質を評価する場合、画像のエッジと画像の鮮明さ、さらに、画像のテクスチャなどを定量的に評価する。そこで、エッジ保持指数、画像鮮明度、細部保持指数を用いる。エッジ保持指数は、画像のエッジ付近の濃淡変化の維持力を評価する指標である。エッジ保持指数の値が大きいほど、エッジの保持力がより強く、反対により弱いことを表す。画像鮮明度と細部保持指数は地物の真の反射特性を評価する指標である。画像鮮明度は画像にある対象物の見易さを評価する指標であり、細部保持指数はフィルタリング処理前後の画像間の相関係数を用いて画像のテクスチャと微細な構造の維持力を反映する。それぞれの値が大きいほど、保持力がより強いことを意味し、反対により弱いことを表す。

4. スペックルノイズの低減処理

4.1 処理フロー

図1に本研究のスペックルノイズの低減処理・評価のフローを示す。TSX 反射強度画像のスペックルノイズの低減処理と評価は、Lee, Frost, Gamma Mapを用いたフィルタリング処理、異なるウィンドウサイズによるスペックルノイズの低減効果の評価、最適なウィンドウサイズの選定からなる。以下に詳細を述べる。

- (1) TSX の反射強度画像に対して、6つのウィンドウサイズ(3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 , 11×11 , 13×13)に設定した3種類のフィルタ(Lee, Frost, Gamma Map)を用いて、フィルタリング処理を行う。
- (2) それぞれの処理結果に対して、標準偏差, 有効ルック数, スペックルノイズの圧縮指数, エッジ保持指数, 画像鮮明度および細部保持指数の6つの評価指標を用いて、異なるフィルタのスペックルノイズの低減効果を比較・評価する。
- (3) 異なるウィンドウサイズのスペックルノイズ低減

図1 処理フロー

効果の評価結果に基づき、有効なウィンドウサイズを選定する。

4.2 対象エリアと使用データ

スペックルノイズの低減効果の評価に使用したデータは、2009年に撮影された TSX データである。反射強度の異なる複数時期の画像を利用してノイズの低減効果を検討するため、2009年5月1日(DOY131)、7月6日(DOY187)、7月28日(DOY209)、および、8月30日(DOY242)の4時期のHH偏波とVV偏波の画像データを使用した。この4時期のデータは、それぞれ水稻の移植直後、最高分げつ期の直前、最高分げつ期と出穂期の間、および、出穂後のデータであり、水稻生育成長の各段階における TSX データのノイズ低減効果进行评估することが可能である。TSX データの入射角はすべて49度で、ピクセルサイズは1mにリサンプリング処理されている。また、これらのデータはすべてマルチルック処理、地図投影処理、および、地形補正済みのEEC(Enhanced Ellipsoid Correct)プロダクトである。

対象エリアは、図2に示す宮城県古川農業試験場周辺とした、比較的、水田が多い地域である。対象エリアの大きさは、1024画素×1024画素である。

本研究のスペックルノイズの低減処理の解析は、市販のリモートセンシング画像処理ソフトウェア

図2 対象エリア

ERDAS Imagine を利用した。

5. スペックルノイズの低減処理の結果及び考察

表2は、DOY131, DOY187, DOY209, および、DOY242のHH偏波とVV偏波の反射強度画像に対して、前節の3.に示した6つの評価指標を用いた Lee, Frost, Gamma Map フィルタによるスペックルノイズ低減効果の評価結果である。標準偏差, 有効ルック数の結果の中に、フィルタリング処理前の結果が黒い線, Lee, Frost, Gamma Map の処理結果がそれぞれ青線, オレンジ線, 緑線で示されている。フィルタリング処理前の結果に比べ、フィルタリング処理後の画像の標準偏差は小さくなり、有効ルック数は高くなったことが確認された。また、スペックルノイズの圧縮指数の結果では、フィルタリング処理後の結果は1より低くなったことも確認された。これらの結果から、SAR 画像に対してフィルタリングを適用することによって、スペックルノイズを低減できることが分かった。

いずれの時期においても、青線で示される Lee フィルタによる処理結果の標準偏差, スペックル圧縮指数の値が最も大きく、有効ルック数が最も小さかったことから、スペックルノイズの低減効果が最も小さいと

表2 反射強度画像のスペックルノイズの低減効果の評価

考える。それに対して、オレンジ線で示される Gamma フィルタによる処理結果の標準偏差、スペックル圧縮指数の値が最も小さく、有効ルック数が最も大きかったことから、スペックルノイズの低減効果が最も大きいと考えられる。また、Lee フィルタのスペックルノイズの低減効果が最も小さい一方、エッジ保持指数、鮮明度、および、細部保持指数の値がその他のフィルタより大きく、画質の保持には Lee フィルタが最も効果が良いとみられる。それに対して、Gamma フィルタの画質保持効果が最も低かったことが示されている。なお、緑線で示される Frost フィルタのスペックルノイズの低減効果と画質保持効果は、いずれも Lee フィル

タと Gamma フィルタの間にあったことが確認されている。そのため、目的や研究対象に応じて、適切なフィルタを選択する必要があると考える。

また、表2の評価結果より、Lee, Frost, Gamma のいずれのフィルタでも、ウィンドウサイズが大きくなるに連れ、スペックルノイズの低減効果がより大きくなり、画質保持効果がより低くなる傾向が示されている。ウィンドウサイズが5×5より大きくなると、標準偏差、スペックル圧縮指数、エッジ保持指数、画像鮮明度指数、ならびに細部保持指数の変化は緩やかになっていった傾向が示されている。さらに、ウィンドウサイズが9×9より大きくなると、各評価指数の変化

はより平坦なものとなっていたことが確認されている。これは、スペックルノイズの圧縮と画質の保持の両面において、ウィンドウサイズが 9×9 より大きくなっても、フィルタリング処理の効果はそれほど変わらないことを意味する。使用したTSXデータは、高分解能SpotLight (HS) モードの観測によって取得された分解能 $2.2 \times 3.3\text{m}$ の原画像をピクセルサイズ 1m の画像にリサンプリング処理されたものである。ウィンドウサイズ 9×9 でのフィルタリング処理は、原画像に対して 3×3 のウィンドウサイズで処理することと同様な効果があると考えられる。そのため、水稻の生育状況のモニタリングを目的としたピクセルサイズ 1m の反射強度画像のスペックルノイズ低減処理では、 9×9 のウィンドウサイズは最適なものであると考えられる。

6. ま と め

本研究では、SARによる水稻の生育状況のモニタリングを目的として、スペックルノイズの多いSARデータを光学センサのような画素ごとの処理に利用する条件を求めるために、高空間分解能衛星TerraSAR (以降：TSX) が取得した4時期のHH偏波とVV偏波の反射強度画像を用いて、スペックルノイズの低減効果を評価した。まず、Lee, Frost, Gamma Mapの3種類のフィルタを用いて、異なるウィンドウサイズによるフィルタリング処理を行った。次に、標準偏差、有効ルック数、スペックルノイズの圧縮指数、エッジ保持指数、画像鮮明度および細部保持指数の6つの評価指標を用いて、異なるフィルタのスペックルノイズの低減効果を比較・評価した。最後に、異なるウィンドウサイズのスペックルノイズ低減効果の評価結果に基づき、有効なウィンドウサイズを選択した。

異なるフィルタのスペックルノイズの低減効果の評価結果から、Lee, Frost, Gammaのいずれのフィルタでも、TSX画像のスペックルノイズを低減できることが分かった。また、いずれの時期においても、Leeフィルタのスペックルノイズの低減効果が最も小さく、Gammaフィルタのスペックルノイズの低減効果が最も大きかったことが示されている。それに対して、Leeフィルタの画質保持効果が最も高く、Gammaフィルタの画質保持効果が最も低かったことが示されている。Frostフィルタのスペックルノイズの低減効

果と画質保持効果は、いずれもLeeフィルタとGammaフィルタの間にあったことが確認されている。そのため、目的や研究対象に応じて、適切なフィルタを選択する必要があると考える。

異なるウィンドウサイズのスペックルノイズ低減効果の評価結果から、Lee, Frost, Gammaのいずれのフィルタでも、ウィンドウサイズが大きくなるに連れ、スペックルノイズの低減効果がより大きくなり、画質保持効果がより低くなる傾向が示されている。ウィンドウサイズが 9×9 より大きくなると、各評価指数の変化はより平坦なものとなっていることが確認されている。そのため、水稻の生育状況のモニタリング目的としたピクセルサイズ 1m の反射強度画像のスペックルノイズ低減処理では、 9×9 のウィンドウサイズは最適なウィンドウサイズとして選定した。

本研究では、低・中分解能のSAR画像を対象として提案されたスペックルノイズの低減処理フィルタの高分解能SAR画像への適用性について取り上げ、検討を行った。各種フィルタにおけるスペックルノイズの低減効果の特徴を明らかにし、その処理結果を効率的に評価する方法を提示した。本研究は高分解能SARを利用して地表面の詳細な情報をより精度よく取得するための基礎研究として、農業モートセンシング分野における高分解能SARのさらなる利活用に寄与するものと期待される。今後、水稻圃場のみを対象として検証すると考える。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、千葉大学名誉教授安田嘉純先生から貴重なご教示をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

(受付日2015.7.9, 受理日2015.7.10)

参考文献

- 木村篤史, 島村秀樹, 安田嘉純, 2013. 高分解能Xバンド2偏波SAR画像による水稻の生育・収量の調査, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 52, No. 3, pp.127-140.
- Cable, J.W., Kovacs, J.M., Jiao, X. and Shang, J., 2014. Agricultural Monitoring in Northeastern Ontario, Canada, Using Multi-Temporal Polarimetric RADARSAT-2 Data, Remote Sensing, 6,

- pp.2343-2371.
- Frost, V.S., Stiles, J.A., Shanmugan, K.S. and Holtzman, J.C., 1982. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 4, No. 2, pp.157-166.
- Hong, G., Wang, S., Li, J. and Huang, J., 2015. Fully Polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) Processing for Crop Type Identification, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 81, No. 2, pp.109-117.
- Huang, Y. and Genderen, J.L., 1996. Evaluation of Several Speckle Filtering Techniques for ERS-1& 2 Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part B2, pp.164-168, Vienna, Austria.
- Lee, J.S., 1981. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images, *Computer graphics and image processing*, Vol. 17, pp.24-32.
- Lopes, A., Nesry, E., Touzi, R. and Laur, H., 1990. Maximum a Posteriori Speckle Filtering and First Order Texture Models in SAR Images. *Proceedings of IGARSS' 90*, Vol. 3, pp.2409-2412, Maryland, USA.
- Moran, M.S., Alonso, L., Moreno, J.F., Mateo, M.P. C., Cruz, D.F. and Montoro, A., 2012. A RADAR-SAT-2 Quad-Polarized Time Series for Monitoring Crop and Soil Conditions in Barrax, Spain, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 4, pp.1057-1070.
- Pitas, I. and Venetsanopoulos, A.N., 1990. Nonlinear digital filters, *Principles and Applications*, Kluwer Academic Publisher, ISBN : 0792390490, Boston, USA.
- Qiu, F., Berglund, J., Jensen, J.R., Thakkar, P. and Ren, D., 2004. Speckle Noise Reduction in SAR Imagery Using a Local Adaptive Median Filter, *GIScience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 3, pp. 244-266.
- Xiao, J., Li, J. and Moody, A., 2003. A detail-preserving and flexible adaptive filter for speckle suppression in SAR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 12, pp.2451-2465.