

博士論文

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

高久 淳一

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

Noise reduction of digital elevation models derived from satellite
optical sensors

主査	岩崎 晃	教授
副査	六川修一	教授
副査	中村 尚	教授
副査	沖 一雄	准教授
副査	矢入健久	准教授

高久 淳一

東京大学大学院 工学研究科 先端学際工学専攻

2017 年 2 月

論文の要旨

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

Noise reduction of digital elevation models derived from satellite optical sensors

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グローバ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 および約 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。

目次

第 1 章	はじめに.....	1
1.1	本研究の背景.....	1
1.1.1	衛星リモートセンシングによる DEM データ.....	2
1.1.2	衛星光学センサによる DEM データのノイズ.....	5
1.2	本研究の目的.....	12
1.3	本研究の独自性.....	13
1.4	本研究の構成.....	14
第 2 章	DEM データ処理とノイズ解析.....	16
2.1	ALOS/PRISM を用いた DEM データ処理.....	16
2.1.1	DEM データ処理概要.....	16
2.1.2	ステレオマッチングアルゴリズム.....	18
2.2	DEM データのノイズ解析.....	20
2.2.1	姿勢ジッタによるシステムノイズの検知.....	20
2.2.2	姿勢ジッタによるシステムノイズの解析.....	25
2.2.3	ランダムノイズの解析.....	28
第 3 章	DEM システムノイズ低減手法の開発.....	33
3.1	姿勢ジッタノイズの解析.....	33
3.1.1	姿勢ジッタと DEM のノイズとの関係.....	33
3.1.2	ALOS 衛星の姿勢データ.....	36
3.2	低周波ジッタノイズの低減.....	42
3.2.1	高周波姿勢データの適用.....	42
3.2.2	衛星姿勢データ応答特性の解析と修正.....	45
3.3	高周波ジッタノイズの低減.....	54
3.3.1	高周波ジッタノイズの特徴.....	54
3.3.2	ウェーブレットフィルタ.....	57
3.3.3	高周波ジッタノイズ低減へのウェーブレットフィルタ適用.....	60
3.3.4	フィルタ処理による高周波ジッタノイズ低減効果の確認.....	65
3.4	DEM システムノイズ低減手法のまとめ.....	71
第 4 章	DEM ランダムノイズ低減手法の開発.....	73
4.1	DEM ランダムノイズの低減.....	73
4.2	ノンローカルフィルタの DEM への適用.....	76
4.2.1	ノンローカルフィルタ.....	76
4.2.2	光学センサ DEM への適用.....	78
4.2.3	パラメータの設定.....	82
4.2.4	精度評価.....	85
4.2.5	高さの局所分散の適用.....	96
4.3	他のフィルタ手法との比較.....	101

4.4 DEM 応用性の評価	107
4.5 DEM ランダムノイズ低減手法のまとめ	109
第 5 章 将来衛星適用性確認	110
5.1 将来衛星データシミュレーション	110
5.1.1 ステレオシミュレーションデータの作成	111
5.1.2 DEM 処理	114
5.2 ノンローカルフィルタの適用	117
5.3 将来衛星適用性確認まとめ	124
第 6 章 おわりに	125
6.1 結論	125
6.2 今後の展望	127
参考文献	128
謝辞	137

図 目 次

図 1-1	衛星による主な DEM データ取得ミッション	3
図 1-2	画像の地上解像度(GSD)に対する DEM 高さ精度(RMS)の関係	11
図 1-3	本研究の構成の概略	14
図 2-1	PRISM からの DEM 作成アルゴリズム概略フロー	17
図 2-2	三方向視同時マッチングの概念 [Takaku <i>et al.</i> , 2009a を改変]	18
図 2-3	DEM の 1 km ジッタサンプル (12km x 12km)	21
図 2-4	DEM の 100 m ジッタサンプル (3 km x 3 km)	21
図 2-5	全評価シーンに対する 1 km ジッタ発生位置の分布	23
図 2-6	全評価シーンに対する 1 km ジッタ発生位置の分布	23
図 2-7	軌道周回数 1000 毎の作成 DEM シーン数及び各ジッタ発生シーン数.....	24
図 2-8	1km ジッタの高さプロファイル位置 (左図赤線) および高さプロファイ ル	25
図 2-9	100m ジッタの高さプロファイル位置 (左図赤線) および高さプロファ イル	26
図 2-10	1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均.....	27
図 2-11	100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均.....	27
図 2-12	LiDAR/DEM エリアの PRISM 直下視画像と評価エリア	29
図 2-13	LiDAR/DEM の陰影図 (Shaded Relief) 画像	29
図 2-14	PRISM/DEM と LiDAR/DEM の高さの差のヒストグラム	31
図 3-1	三方向視ステレオモデルにおけるセンサ姿勢の概念	33
図 3-2	ステレオ画像間のピッチ角ジッタ誤差と DEM の高さ周期ノイズの関係	35
図 3-3	1 km ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値プロファイル.....	38
図 3-4	1 km ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値 FFT 振幅スペクトル	39
図 3-5	100 m ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値プロファイル.....	40
図 3-6	100 m ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値 FFT 振幅スペクトル	40
図 3-7	1 km ジッタ DEM サンプル (12 km x 12 km)	42
図 3-8	1 km ジッタ DEM サンプルの高さプロファイル	43
図 3-9	1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均	43
図 3-10	DEM の 1 km ジッタサンプル (16 km x 16 km)	44
図 3-11	DEM の 1 km ジッタサンプルの AW3D との差画像 (16 km x 16 km)	44
図 3-12	1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均.....	45
図 3-13	1 km ジッタ残留データの HAD 姿勢ピッチ角計測値 FFT 振幅スペクト ル	46
図 3-14	HAD ₀ による作成 DEM.....	47
図 3-15	1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均の比較.....	47

図 3-16	1 km ジッタ DEM の振幅及び位相比較 (凡例中 DEM を省略).....	49
図 3-17	DEM のジッタノイズから推定した姿勢ジッタ応答誤差の補正および DEM ジッタノイズの補正	51
図 3-18	HAD _G による作成 DEM	52
図 3-19	1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均の比較	52
図 3-20	HAD による作成 DEM グレースケール画像	55
図 3-21	100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均.....	56
図 3-22	DEM の 100m ジッタサンプルにおけるレベル 4 までの MRA	59
図 3-23	試行した直交ウェーブレットのプロファイル	61
図 3-24	試行直交ウェーブレットによる r_d 値の比較	62
図 3-25	レベル 3 ウェーブレット係数 (Coiflet $M = 6$)	62
図 3-26	100 m ジッタ DEM の MRA レベル 3 における水平・垂直ウェーブレッ ト係数絶対値のヒストグラム	64
図 3-27	ウェーブレットフィルタ前後の DEM 比較.....	66
図 3-28	100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均ーエリ ア(a).....	67
図 3-29	100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均ーエリ ア(b).....	67
図 3-30	100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均ーエリ ア(c).....	68
図 3-31	100 m ジッタの高さプロファイルの比較	68
図 3-32	フィルタの違いによる DEM の比較 左: FFT フィルタ, 右: DWT フィ ルタ	69
図 3-33	フィルタの違いによる DEM の比較	70
図 4-1	PRISM 三方向視画像と作成 DEM 拡大図 (250m x 250m)	74
図 4-2	ノンローカルフィルタの PRISM 画像への適用例 (500 m x 500 m)	77
図 4-3	ノンローカルフィルタの PRISM DEM への適用例 (2 km x 2 km)	79
図 4-4	ノンローカルフィルタの PRISM DEM への適用例 (2 km x 2 km)	81
図 4-5	異なる SNR_o による PRISM DEM の LiDAR DEM からの差の標準偏差.....	83
図 4-6	異なる σ_h による PRISM DEM の LiDAR DEM からの差の標準偏差	84
図 4-7	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Paddy1 (2 km x 2 km)	86
図 4-8	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Paddy2 (2 km x 2 km)	87
図 4-9	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Village1 (2 km x 2 km)	88
図 4-10	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Village2 (2 km x 2 km)	89
図 4-11	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Forest1 (2 km x 2 km)	90
図 4-12	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Forest2 (2 km x 2 km)	91
図 4-13	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Mountain-top (2 km x 2 km)	92
図 4-14	DEM 評価エリアにおける画像比較 — Mountain-valley (2 km x 2 km)	93
図 4-15	平坦域におけるフィルタ前後の DEM および参照 DEM の高さプロファ	

	イルの比較.....	95
図 4-16	PRISM DEM の高さ標準偏差の分布例 (2 km x 2 km)	97
図 4-17	高さ局所分散を重みとしたノンローカルフィルタによる DEM 陰影図.....	98
図 4-18	高さ局所分散を重みとしたノンローカルフィルタによる DEM 陰影図.....	99
図 4-19	フィルタの違いによる DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較	103
図 4-20	フィルタの違いによる DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較	104
図 4-21	DEM による洪水シミュレーション模擬画像 (5 km x 5 km)	108
図 5-1	シミュレーション画像投影モデル.....	111
図 5-2	ADS40 による衛星光学ステレオシミュレーション画像 (筑波山山頂付 近)	112
図 5-3	作成した各解像度によるシミュレーション画像の一部拡大図 (160 m x 160m).....	113
図 5-4	後方視 0.8 m による DEM (下) 及びオルソ画像 (上) の概要.....	114
図 5-5	後方視 0.8 m による DEM の参照 DEM による差画像.....	115
図 5-6	各エリアにおける DEM 誤差標準偏差の後方視解像度間比較.....	116
図 5-7	将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の 比較	118
図 5-8	将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の 比較	119
図 5-9	将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の 比較	120
図 5-10	将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の 比較	121
図 5-11	作成 DEM の各エリアにおける標準偏差のフィルタ前後による比較.....	123

表 目 次

表 1-1	光学センサステレオ画像の AT 地上解像度および DEM データの精度	10
表 2-1	DEM のランダムノイズ評価の参照 LiDAR における種別	28
表 2-2	PRISM/DEM と LiDAR/DEM の高さの差の統計値 (単位:m)	30
表 3-1	各周期誤差の振幅及び位相	48
表 3-2	PRISM/DEM と LiDAR/DEM の高さの差の統計値 (単位:m)	50
表 4-1	参照 DEM からの高さの差の統計値—フィルタ前(Pre-)後(Post-)の比較	94
表 4-2	ノンローカルフィルタ(高さ局所分散適用)による PRISM DEM と LiDAR DEM の高さの差の統計値 (単位:m)	100
表 4-3	参照 DEM からの高さの差の統計値—異なるフィルタによる比較	106
表 5-1	ステレオシミュレーション画像の地上解像度組み合わせ	110
表 5-2	各解像度組み合わせによる DEM の参照 DEM からの高さの差の統計値 (単位: m)	115
表 5-3	ノンローカルフィルタ適用 DEM の参照 DEM からの高さの差の統計値 (単位: m)	122

第1章 はじめに

1.1 本研究の背景

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 (Geographic Information System: GIS) 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・氷河融解などの災害監視、森林体積・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。また、これら GIS 分野で共に利用される航空写真・衛星画像データの地形補正のための源泉データとしても重要な役割を担っている。地形データの中でも地上の等間隔グリッド (メッシュ) における標高値として数値化されたラスタ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国毎に整備が進められてきた。日本においては国土地理院が 1993 年から日本全土の 50m メッシュ DEM の整備を開始しており、2008 年には 10m メッシュへの更新を完了している。また現在は主に都市部を中心として 5 m メッシュへの更新も進められている¹。アメリカでは、アメリカ地質調査所 (United States Geological Survey: USGS) が、1970 年代中期からアメリカ全土の DEM データセット (National Elevation Dataset: NED) の作成を開始し、1999 年に 30 m、および 10 m メッシュデータの整備を完了している [Gesch *et al.*, 2002]。また現在はエリアによっては 1 m メッシュといったより高解像度なデータへの更新が計画されている。また、イギリス、スイス、オーストラリアといった国においても自国の DEM データをそれぞれの公的機関が主体となって整備・更新してきている [Smith, 2010; O'Sullivan *et al.*, 2008; Trinder, 2016]。このように DEM は、様々な国や地域毎に整備・更新・利用が進められてきたが、その作成方法などに依存したメッシュサイズや精度・品質は作成国や地域によって異なっていた。また特にアジアやアフリカ、南米などでは国主体での DEM 整備が行われていない国も多く存在する。DEM データ応用分野の中でも特に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、このようなデータ品質のばらつきや部分的な欠損が大きな問題になることが考えられ、これら制約の無いグローバル且つ～数十 m の高解像度なメッシュサイズとそれに沿った標高精度を持つ DEM データの整備は近年 GIS 分野における主要課題の一つとなってきた。

DEM の作成方式としては、当初は伝統的な航空写真測量により作成された地図上の等高線をラスタ化するという間接的な方法が取られており、国土地理院の 50 m / 10 m メッシュ DEM や USGS による NED の一部もそれによるものであった [Murakami, 1995; Gesch *et al.*, 2002]。一方、現在はカメラのデジタル化やデジタル画像の自動ステレオマッチング技術によるデジタル写真測量、および汎用の計算機スペックの進化と相ま

¹ 国土地理院ホームページ <http://www.gsi.go.jp/>

って、航空写真データから DEM を直接的に取得する方法が既に実用化されている。更に、現在ではより高解像度かつ高精度な DEM 作成を目指した航空機搭載の合成開口レーダー干渉技術 (Interferometric Synthetic Aperture Radar: InSAR) や Light Detection and Ranging (LiDAR) を用いた手法が主流となってきている。国土地理院の 5 m メッシュ DEM の整備では LiDAR を用いている他、USGS の 1 m メッシュ DEM の作成では InSAR と LiDAR の双方を用いる計画となっている [Sugarbaker *et al.*, 2014]。また最新技術として、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 搭載のデジタルカメラデータと SfM (Structure from Motion) と称した測量技術により更に高解像度・高精度の DEM を作成する試みなども行われている [Fonstad *et al.*, 2013]。但し、これら航空機や UAV による手法では、一度に取得できるデータ範囲が限られ、全球スケールでの DEM データ整備は時間的にも費用的にも現実的ではないことが明らかである。よって、1990 年代頃より衛星リモートセンシングによる DEM (衛星 DEM) 作成の本格的な研究が進められてきた。ところが衛星 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に関する知見が未だ不十分であり、それぞれの方式でより詳細な解析が求められている。

なお、用語の定義として、航空機や衛星から作成される DEM は、樹木や建物などの高さを含む数値表層モデル (Digital Surface Model: DSM) であり、それらを除いた地盤高を示す数値地形モデル (Digital Terrain Model: DTM) とは区別される。DEM は、高さデータセットの総称であり、利用分野によって DSM を指すこともあれば DTM を指すこともあるが、本研究において以降では DSM を指すものとして使用し、地盤高を指す場合は DTM を使用する。なお、上記国土地理院の DEM および USGS の NED などは DTM である。

1.1.1 衛星リモートセンシングによる DEM データ

衛星 DEM データの主な利点は一般に、広域性、連続性、均質性、トータルコストといったものであり、特にグローバルデータ整備の観点では最も適した手段であると考えられる。一方、欠点としては、観測機器からターゲットまでの距離が遠いことに起因し、観測データの解像度や精度の面では実地観測や航空機観測に及ばないといったことが挙げられる。すなわち衛星 DEM の有用性を考慮するに当たっては、その解像度と精度に係る考察が非常に重要となる。

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、複数の光学ラインセンサ (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、設置位置の異なる一組のバイスタティックレーダーアンテナを用いて SAR 画像ペアを常時取得する InSAR によるものの 2 種類に分類される。両者の主な特徴の違いとしては、まず光学センサでは DEM 作成手法としてステレオ視による三次元座標推定に基づく伝統的な航空写真測量の概念が応用可能であり、センサ機器および処理装置の実装が比較的容易であることが挙げられる。また品質に関しては、対象地域の地形依存性は比較的少ないが、雪氷などテクスチャの少ない地域ではステレオマッチングの難しさから精度が低下するといった問題がある。更にデータ取得に際して被雲や日照の影響を強く受けるといった欠点がある。一方レーダーでは、被

雲や日照の影響がなく安定したデータ取得が可能であるが、高精度なバイスタティックレーダーによる InSAR 処理を実現するためには有効な基線長を保持するレーダー機器の実装に特殊な衛星プラットフォームが必要になることや、処理手法の実装が比較的難しいこと、またレーダー後方散乱が少ない砂漠や、SAR の観測原理に伴いレーダーシャドウ・レイオーバーを起こす急峻地形などでは精度低下やデータ欠損を招くことなどが欠点として挙げられる。図 1-1 に、衛星による光学・レーダー (Optical / Radar) それぞれの主な DEM データ取得ミッションの歴史について示す。

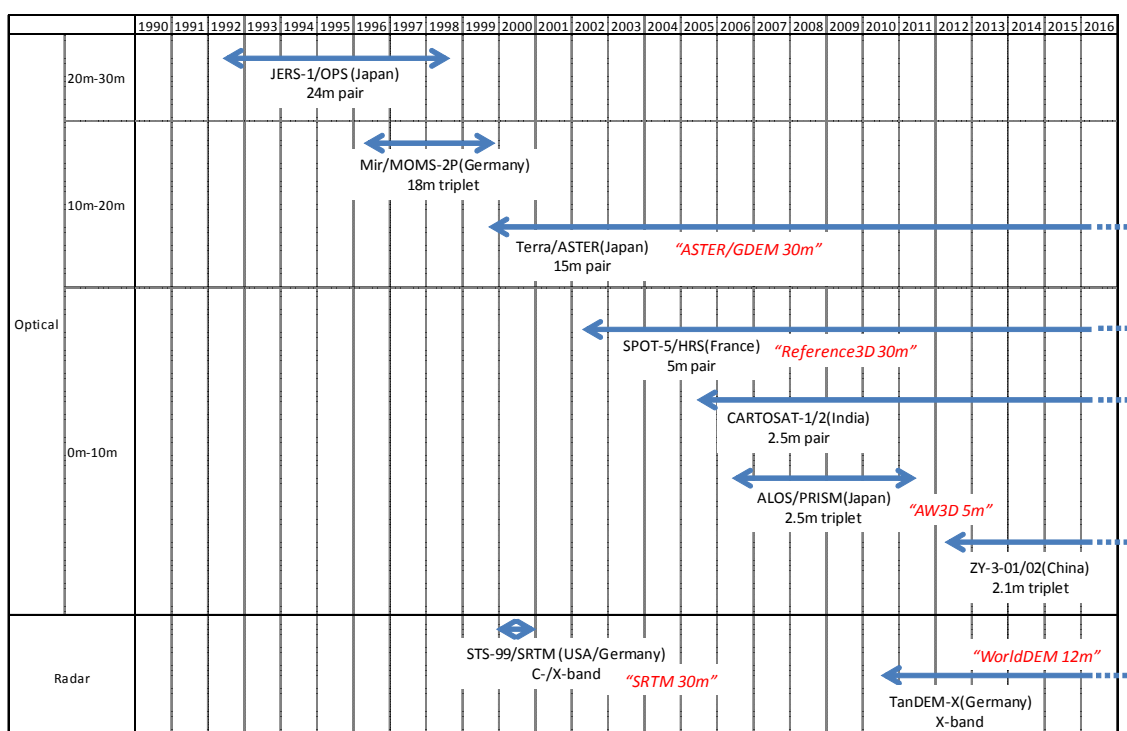


図 1-1 衛星による主な DEM データ取得ミッション

光学衛星 DEM ミッション

衛星 DEM のミッションとしては、まず日本が 1992 年に打ち上げた JERS-1 衛星搭載の光学センサ OPS にて直下視および前方視によるアロングトラックステレオ観測を行ったのが最初であり [Raggam *et al.*, 1996], 次いで 1996 年にドイツがロシアの宇宙ステーション Mir に搭載した同じく光学センサ MOMS-2P では前方視, 直下視, 後方視の三方向視によるステレオ観測を行った [Buyuksalih *et al.*, 2001]。但し, これら 2 つのセンサは未だ実験的要素が強く, いくつかの検証成果は挙げたもののグローバル DEM の整備および実用には至っていない。その後, 1999 年に日本がアメリカの Terra 衛星に搭載した光学センサ ASTER では, 直下視, 後方視によるステレオ観測を開始し, 2009 年から 30 m メッシュのグローバル DEM データ GDEM の提供を行うことで, 後述する SRTM のデータとの相補的な利用が可能となるデータとして注目を集めた [Fujisada *et al.*, 2005;

Iwasaki *et al.*, 2005; Rauter *et al.*, 2009]。また 2002 年からはフランスの衛星 SPOT-5 に搭載された光学センサ HRS による観測が始まり，主に商業ベースの 30 m メッシュグローバル DEM データ Reference3D の整備を行っている [Airault *et al.*, 2003]。2005 年にはインドが CARTOSAT-1 衛星を打ち上げ，直下視，後方視によるステレオ観測を行って主に自国における 10 m メッシュ DEM の整備を進めている [d'Angelo *et al.*, 2008]。また 2006 年には日本が衛星搭載光学ステレオセンサとしては 3 機目となる PRISM を ALOS 衛星搭載センサの一つとして打ち上げ，前方視，直下視，後方視の三方向視によるステレオ観測を行い，2014 年からはグローバル DEM としては商業ベースを含めて現状最も高解像度な 5 m メッシュグローバル DEM データ AW3D の提供を開始している [Takaku *et al.*, 2014]。また，2012 年には中国が光学センサを搭載した衛星 ZiYuan-3 (ZY-3) を打ち上げ，MOMS-2P, PRISM 同様の前方視，直下視，後方視の三方向視によるステレオ観測を行い，主に自国における 5 m メッシュ DEM の整備を進めている [Gao *et al.*, 2013]。なお，図 1-1 に挙げた以外の DEM 作成を主なミッションとしていない（常時ステレオ観測を行わない）衛星センサにおいても，1990 年代には SPOT 衛星搭載の HRV センサのポインティング機構を用いたクロストラックステレオ観測データによる DEM 作成が試みられている他 [Toutin, 1995]，最近では，アメリカの Ikonos, QuickBird, WorldView や，フランスの Pleiades といった高解像度光学衛星のボディポインティング観測によるステレオデータを用いたより高解像度な DEM について，限定されたエリアでのデータ整備と商業ベースでの提供が行われている [Poon *et al.*, 2005; Toutin, 2004a; Toutin, 2004b; Buyuksalih *et al.*, 2012; Bernard *et al.*, 2012]。

レーダー衛星 DEM ミッション

衛星搭載のバイスタティックレーダーによる DEM 作成ミッションとしては，2000 年にアメリカのスペースシャトル (STS-99) に搭載された SRTM による InSAR 観測が最初である [Farr *et al.*, 2007]。2003 年からは衛星由来のグローバル DEM データセットとしては初となる 90 m メッシュ (2015 年から 30 m メッシュに更新) DEM の提供が開始され，極域や一部急峻山岳，砂漠などの地域でデータ欠損はあるもののその絶対精度の高さおよび精度の均一性によりグローバル DEM データの有用性が大きく注目されるようになった [Rodriguez *et al.*, 2006]。2010 年からは SRTM に次ぐ InSAR の衛星 DEM ミッションとしてドイツがタンデムフライト衛星 TanDEM-X を打ち上げ，2014 年からは商業ベースの 12 m メッシュグローバル DEM データ WorldDEM の提供を開始している [Zink *et al.*, 2015]。

このように，衛星 DEM については，特に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のが現状である。一方，その精度は，主に衛星やセンサの幾何情報に係るモデルの校正残差に伴うシステムチックな誤差 (システムノイズ) と，主に観測画像特徴に伴うランダムノイズに依存する。

以下では光学センサ由来の衛星 DEM における各ノイズの詳細について述べる。

1.1.2 衛星光学センサによる DEM データのノイズ

衛星光学センサによる DEM データの誤差は、基本的にはそのモデルとなる伝統的な航空写真測量で定義された測量誤差に基づくものとなるが、衛星ラインセンサに特化したシステムノイズ、および主にステレオ画像マッチングに依存したランダムノイズにより構成される。衛星光学センサによる DEM データのノイズを $\varepsilon(x, y)$ とすると、その構成は大まかに以下のように表すことができる。

$$\varepsilon(x, y) = \delta_s(x) + \delta_p(y) + \delta_a(y) + \sigma_p(x, y) + \sigma_m(x, y) \quad (1.1)$$

ここで、 x, y は DEM データにおいて、衛星軌道の地上軌跡に対する直交方向、および並行方向をそれぞれ各軸とした座標位置であり、 δ_s はセンサモデル、 δ_p は衛星位置、 δ_a は衛星姿勢によるそれぞれシステムノイズに該当する。すなわち、センサモデルに係るノイズは衛星軌道直交方向のラインセンサに沿ったシステムノイズとなり、衛星位置と姿勢に係るノイズは基本的に衛星軌道方向に沿ったシステムノイズとなる。一方、 σ_p および σ_m は、それぞれ DEM 作成過程におけるデータリサンプリングや数値演算の丸めなどに伴う処理ノイズ、およびステレオ画像マッチングに伴うノイズであり、基本的には共に衛星軌道など衛星固有のパラメータに依存しないランダムノイズである。

以下、各ノイズ要因の概要について述べる。

センサモデル

センサモデルは、航空写真測量における内部標定パラメータに該当し、光学レンズやミラーの焦点距離や歪、CCD デテクタライン配置などのセンサ内部機構、およびセンサの衛星取り付けアライメントなどによって決まるセンサ固有のモデルである。センサの内部構造に基づくモデルは、基本的にはラインセンサの各画素について、センサ固有の三次元座標における視線ベクトルを算出するためのパラメータとして定義され、その誤差は、ステレオモデルにおける CCD デテクタラインに沿ったシステムチックなノイズとして DEM の精度に影響する。基本的には、これら内部パラメータは静的なパラメータとしてセンサ打ち上げ前の地上試験にて計測され、打ち上げ直後にこれらを初期値として周密な地上基準点 (Ground Control Point: GCP) など参照データを用いた軌道上校正を行うのが一般的であるが、校正の方法や使用する GCP の分布などはセンサ固有のものとなる [Jacobsen, 2004; Poli, 2005]。一方、センサの衛星取り付けアライメントは、センサ固有の三次元座標系と、衛星軌道・姿勢が定義された三次元座標系との間の変換を与えるデータであるが、その扱いは姿勢データとほぼ同義となり外部標定要素の一部とみなされる。但し、センサアライメントは衛星姿勢と違い基本的には静的であり、GCP を用いた校正によるパラメータ推定以外に軌道上での計測は行われない。

静的パラメータであるこれらセンサモデルの誤差は、通常上記打ち上げ後の校正によって十分に補正されるため、DEM 精度への影響や補正方法などの報告も比較的少ないが、例えば、Cartsat-1 による DEM のセンサモデル由来のノイズの傾向と、アフィン変換を用いたセンサモデル修正の効果などが報告されている [Jacobsen, 2016]。これ以外には、

火星探査ミッションの一つとして打ち上げられた光学ラインセンサ HiRISE によるステレオ画像から作成した火星の DEM について、CCD ディテクタ配置データの誤差に由来するシステムノイズに関する報告などもある [Ayoub *et al.*, 2008]。本ケースは、センサモデルについて、GCP などの参照データを用いた打ち上げ後の軌道上校正が行えないという特殊な条件の中で起こったものと考えられるが、地球観測センサでも仮にセンサモデルの軌道上校正が十分に行われていない場合は同様の事象が発生することが予想できる。

衛星位置

航空写真測量における外部標定要素のカメラ位置パラメータに該当し、DEM 作成を行う地上に固定された三次元空間において、ステレオ視を構成する各センサの位置として定義される。これら各センサの位置誤差は、後述の姿勢誤差と相まって、計測対象の地表面を含む空中三角測量のステレオモデル全体のシフトや傾きに寄与し、作成される DEM の主にシステムノイズに影響する。センサの位置は、近年では航空機や衛星などセンサのプラットフォームに搭載した Global Positioning System (GPS) 受信機で計測されたデータを地上の後処理により高精度化し、更に必要に応じて GCP を用いた外部標定により修正して使用する [Heipke *et al.*, 2002]。なお、伝統的な航空写真測量で用いられたカメラは基本的に中心投影であり一枚の写真に該当するカメラ位置は一点であるのに対し、衛星画像の取得に用いられるラインセンサは衛星進行方向について並行投影であり一枚の画像に該当するセンサ位置がライン数分存在するため、その誤差も厳密にはライン毎に定義される。但し、これらのライン毎の衛星位置の計測は時間間隔的に困難であり、その誤差を個別に評価・修正するのも GCP など基準点配置の観点で現実的ではない。更に、衛星の軌道は航空機などに比べ十分安定であることなどから、計測を 1 分や 1 秒といったある一定時間間隔で行い、ライン毎の位置は補間から求める方法が一般的である。またその誤差については、ラインに関する低次の多項式などでモデル化して評価・修正する方法などが提案されている [Lee *et al.*, 2000; Fritsch *et al.*, 2000]。なお近年の衛星では、GPS による軌道位置計測精度が飛躍的に上昇し、観測画像の地上解像度に対する誤差がほぼ無視できる程度にまでなっていることから、GCP を用いた修正を行わずに DEM 作成が可能となるケースも多くなっている [Iwata *et al.*, 2008; Takaku *et al.*, 2009a]。

衛星姿勢

衛星位置と同じく航空写真測量における外部標定要素のカメラ方向パラメータに該当し、ステレオ視を構成する各センサ光軸の三次元座標空間内での 3 軸（ロール、ピッチ、ヨー）角度、或いは回転として定義される。これらセンサの姿勢誤差は上述の位置誤差と同様にステレオモデルの誤差に繋がり DEM の主にシステムノイズに影響するが、衛星はセンサ位置から観測ターゲットまでの距離が航空機などに比して非常に大きいことにより高いレベルの姿勢計測精度が要求される。ラインセンサ観測画像に対する衛星姿勢も、位置と同様に一枚の画像内でライン数分の姿勢が存在するが、これら衛星姿勢は、地球センサ (Earth Sensor Assembly: ESA) やスタートラッカ (Star Tracker: STT) などの姿勢センサによりある一定時間間隔で計測され、ライン毎のデータはその補間により求

めるのが一般的である [Springman, 2013]。その誤差については、衛星位置同様、必要に応じてラインに関する多項式によってモデル化され GCP を用いた外部標定により修正が行われる [Lee *et al.*, 2000; Fritsch *et al.*, 2000]。但し、衛星姿勢は、太陽電池パドルや姿勢制御用リアクションホイール、衛星間通信のための可動アンテナなど、振動（ジッタ）を引き起こす衛星搭載機器の影響を受けることで比較的高周波な無視できない変動を含む場合があることが知られ、その影響は観測画像データの衛星進行方向に沿った周期的な位置誤差となって現れる。よって上述の姿勢センサによる姿勢計測について、ジャイロを用いた慣性基準装置 (Inertial Reference Unit: IRU) などより高い周波数帯での姿勢計測が可能な角速度センサを併用することで、サンプル間隔の高レート化を図っている [Springman, 2013]。但し、そのレートおよび精度については画像或いはそれに由来する DEM のノイズの補正に際して必ずしも十分でない場合がある。更にこれら周期的な姿勢誤差の修正を外部標定で行う場合においても、その周波数に沿った GCP など基準データの配置が必要となり、特にグローバルデータ整備においては現実的でない。

これら衛星姿勢のジッタ計測誤差の影響やその補正方式に係る報告については、特に近年の光学センサの高解像度・高精度化とその利用形態の高度化に伴い増えてきている。ASTER では、アロングトラックステレオのラインセンサと同様に、マルチスペクトルバンド間で狭角のステレオ視を行う Short-wave infrared (SWIR) センサの視差データを利用して姿勢ジッタの推定を行う方法が示され、Terra 衛星から提供される約 1 Hz (1 秒間隔) の姿勢データに対して、それを超える 1.5 Hz の姿勢ジッタが検知されたことが報告されている [Teshima *et al.*, 2008; Iwasaki, 2011]。また、Pleiades でも同様の手法により衛星の微小ジッタの検知を行った結果が報告されている [Amberg *et al.*, 2013]。QuickBird については、観測時期の異なる一組の画像間のマッチングを用いて、姿勢データでは計測できていない 1 Hz および 4.3 Hz の周波数帯のジッタを検知する方法が示された [Ayoub *et al.*, 2008]。ZiYuan-3 では、衛星姿勢のジッタ誤差について、ASTER の場合と同様にマルチスペクトルセンサの狭角ステレオ視差を基に推定する方法、およびステレオデータの横視差 (ステレオ視方向に直交する視差) を基に推定する方法が示され、約 0.62 Hz のジッタ誤差を検出している [Zhu, Y. *et al.*, 2014; Tong *et al.*, 2014]。一方、これらジッタ誤差の DEM 作成に係る影響を直接評価しているケースとしては、例えば ASTER では、DEM の高さ誤差に直接的な影響を与えるピッチ角ジッタ、および DEM の画像内のシステムチックな誤差分布に影響を与えるヨー角ジッタの影響について、異なる 2 時期の観測ステレオデータから作成した 2 つの DEM の相対的な標高差のマップに基づきその周期ノイズを定量化し、直下視および後方視各センサの幾何投影モデルに基づく後処理を用いて修正している [Koga *et al.*, 2011]。これにより、ASTER による 2 時期の DEM の相対差の標準偏差は 40% 程度向上したことが示された。但し、本方式では 2 つの DEM の相対差を評価していることから、必ずペアとなる DEM が必要となるほか、例えばジッタの位相がペア間で揃っている場合など選択したペアの条件によっては十分にノイズを評価できない場合も考えられる。更に、本方式では姿勢誤差自身を直接推定していないためその誤差の特性は不明である。MOMS-2P による DEM については、姿勢計測誤差の影響により衛星の軌道方向に沿って約 50 km および約 5 km といった 2 種類の周期によるそれぞれ 10~15 m, 3~5 m の振幅を持ったジッタノイズが確認されている [Kornus *et al.*,

1999]。但し、その原因など詳細な解析は行われていない。PRISMによるDEMについても同様に、約8 Hzおよび約93 Hzの2種類の帯域にて、それぞれ3 mおよび1 m程度の振幅によるジッタノイズが検出されているが、その原因や対処については十分に議論されていない [Bignone *et al.*, 2008; Fukami *et al.*, 2011]。また、ZiYuan-3では、上述のマルチスペクトルバンドの視差から推定した姿勢ジッタのDEMへの影響について触れられているが、詳細な解析は未だ課題となっている [Zhu Y. *et al.*, 2014]。

処理ノイズ

DEM作成過程におけるデータリサンプリングや数値演算の丸めなどに伴う処理ノイズについては、基本的には処理側の仕様として精度上の影響がでないように配慮されていることが前提とされる。よって、DEMにおいて空間的にランダムに発生するノイズの要因はほぼ以下に挙げるステレオ画像マッチングに伴うノイズに集約される。

画像特徴に伴うマッチングノイズ

光学ステレオ画像のマッチングアルゴリズムは、基準となる画像の任意の点に対してペアとなる画像の対応点を探索し、標高に依存したステレオ視差のマッピングを行う処理であるが、その手法も様々であり各手法の誤差も対象とするステレオ画像の特徴に依存する。

手法の種別としては、まず基準画像上における計測点の分布に関し、大きく分けて特徴点マッチングとエリアマッチングの2つに分類され、前者は前処理として基準となる画像のエッジなどの特徴をフィルタ処理等で抽出し、この特徴点についてペアとなる画像の対応点を求める方式であり、後者は基準となる画像上に等間隔のグリッドを設けて同様の対応点を求める方式である [Zitova *et al.*, 2003]。またこれら双方を組み合わせて使用する方式も提案されている [Gruen *et al.*, 2002]。特徴点マッチングの利点は、前処理による特徴抽出が有効に機能すれば、高精度なマッチング結果が期待できるテクスチャの豊富な点のみについてマッチング処理を行うことができると共に、起伏が少ないフラットなエリアに少ない対応点、起伏が多いエリアに多くの対応点を設けることで、全体としてバランスの良い対応点を分布させることができる。但し、欠点としては、これら特徴抽出のためのフィルタ設計やチューニングは画像特徴に大きく依存するため特にグローバルデータ整備などを対象とした場合に難しいことや、作成される対応点は抽出された特徴点の分布に即した不規則な分布となるため、最終的なDEMデータとしてラスタライズする際のリサンプリング・モデリング等が適切でない場合には地形依存の誤差となってしまうことなどが挙げられる。一方、エリアマッチングの利点としては、チューニングの難しい特徴点抽出のための前処理を必要としないことや、ステレオ対応点も直接ラスタデータとして得られることなど、比較的グローバルデータ整備に適した方法であることから、ASTERやPRISMのグローバルDEM作成アルゴリズムで採用されている [Fujisada *et al.*, 2011; Takaku *et al.*, 2009a]。但し欠点としては、特徴の少ないエリアについてもマッチングを行うため、結果として信頼性が低く誤差の大きい点が発生してしまうことが挙げられ、該当箇所のフィルタによる後処理が最終的なDEMノイズの低減に係り重要となる。

ステレオ画像間の類似度を計測する手段としては、伝統的な手法の一つとして、各対応点を中心とした一定或いは可変サイズの窓内における輝度値のパターンを比較するテンプレートマッチングが挙げられる。類似指標としては伝統的に Sum of Absolute Distance (SAD) や Sum of Squared Distance (SSD) などが使用されてきたが、衛星 DEM の処理においては相互相関係数 (Normalized Cross Correlation: NCC) を用いるケースが多く [Lewis, 1995], 前述の ASTER, および PRISM でも採用されている [Fujisada *et al.*, 2011; Takaku *et al.*, 2009a]。また近年では、相互情報量 (Mutual Information) や Census といった指標によるマッチング結果の類似度と、視差のある一定範囲における空間的な連続性とのバランスをコストで表現し、エネルギー最小化問題として最終的な視差分布を生成する Semi Global Matching (SGM) といった手法も提案され、Cartosat-1 による DEM 作成などに採用されている [Hirsh Muller, 2008; Wurm *et al.*, 2014]。

これらステレオマッチングで得られた視差は、上記、衛星位置や姿勢、センサモデルなど幾何モデル誤差の無い理想状態を仮定すれば、センサのステレオ観測角に依存した Base to Height ratio (B/H) から高さデータに還元される。すなわち

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{B/H} \quad (1.2)$$

であり、ここで Δp はマッチング視差、 Δh はステレオ画像投影面に対する相対的な高さである。すなわち、視差の誤差に対する DEM の高さ誤差も上式に従うものとなる。ここで Δp が画像上の画素単位による計測値では DEM の高さ方向の解像度も画像の地上解像度に沿った解像度に限定されてしまうため、これを補うためにサブピクセル単位の計測値が必要となる。サブピクセル単位のマッチングを行う手段としては、オーバーサンプリングにより解像度を高めた画像上でマッチングを行う方法や [Szeliski *et al.*, 2002], 画素単位で計測した NCC などの類似度指標について周囲の画素の指標と併せて関数フィッティングを行い推定する方法 [Tian *et al.*, 1986; Shimizu *et al.*, 2002], テンプレートマッチングのテンプレートをアフィン変換によりサブピクセルレベルでリサンプリングしながら逐次的に類似度のピークを求める最小二乗マッチングと呼ばれる方法 [Gruen, 1986], また、テンプレート内輝度パターンの FFT 変換による位相差スペクトルを用いた位相相関法 [Feroosh *et al.*, 2002] などが提案されている。なお、グローバル DEM 整備を行っている ASTER, PRISM については、手法のシンプルさおよび処理速度とその精度とのトレードオフにより、NCC の 2 次関数によるフィッティング (パラボラフィッティング) を用いている [Fujisada *et al.*, 2011; Takaku *et al.*, 2009a]。

これら画素単位およびサブピクセル単位のマッチングによる総合的な誤差は、地表面のテクスチャや地形起伏など観測対象の特徴と、画像のノイズ (Signal to Noise ratio: S/N) やボケ (Modulation Transfer Function: MTF) などのラジオメトリック性能に依存するが、後者にシステマチックなノイズが無ければ大局的には正規分布に従うことが言われている [Fujisada *et al.*, 2011]。但し、これら誤差は基本的に画像上の画素単位で定義されることから、DEM の標高誤差に換算された場合にはステレオ画像の視差方向となる衛星軌道方向 (Along Track: AT) の地上解像度 (Ground Sampling Distance: GSD) に即したものに

なることが考えられる。ここで、光学センサを用いた衛星 DEM の高さ誤差に関してこれまでに報告されている結果の例としては、まず GSD = 24.2 m の JERS-1 OPS による DEM について、1/25000 地形図由来の参照 DEM を用いて 51 m RMS 程度と見積もられている [Raggam *et al.*, 1996]。GSD = 6 m (直下視) の MOMS-2P および GSD = 15 m の ASTER による DEM については、1/50000, 1/25000 地形図由来の参照データに対して、最大でそれぞれ 17 m RMS および 28 m RMS 程度となることが示されている [Jacobsen, 2003]。GSD = 5 m の SPOT-5 HRS による DEM については、航空写真測量による参照 DEM に対して、最大で 10 m RMS 程度となることが示されている [Reinartz *et al.*, 2004]。GSD = 2.5 m の Cartosat-1 による DEM については、USGS の NED を参照 DEM として 10 m RMS 程度と見積もられている [Evans *et al.*, 2008]。同じく GSD = 2.5 m の PRISM による DEM については、Ikonos による参照 DEM に対して最大で 5 m RMS 程度となることが示されている [Bignone *et al.*, 2008]。GSD = 2.1 m (直下視) の ZiYuan-3 については、航空写真測量による参照 DEM に対して、最大で 5 m RMS 程度となることが示されている [Jacobsen, 2016]。

これら光学センサステレオ画像の AT 地上解像度および DEM データの精度について、B/H と併せて表 1-1 に整理する。

表 1-1 光学センサステレオ画像の AT 地上解像度および DEM データの精度
(ステレオ画像の S/N, MTF および姿勢ジッタなどシステムノイズの影響を除く)

衛星/センサ	AT 地上解像度 (直下/前 or 後)	B/H (直下-前後間)	DEM 精度 (RMS)
JERS-1/OPS	24.2m / 24.2m	0.3	~51m
Mir/MOMS-2P	6m / 18m	0.5	~17m
Terra/ASTER	15m / 15m	0.6	~28m
SPOT-5/HRS	5m / 5m*	0.6*	~10m
Cartosat-1	2.5m / 2.5m	0.62	~10m
ALOS/PRISM	2.5m / 2.5m	0.5	~5m
ZiYuan-3(01)	2.1m / 3.5m	0.45	~5m

*) 前方-後方のみ, B/H は直下-前後間換算

DEM データの精度は、上述の通り、検証エリアの起伏や土地被覆などの地域特徴、およびセンサの MTF や S/N 等のラジオメトリック性能、また使用した参照データなどにも依存するため、センサ毎にこれら条件が異なる評価結果を厳密に比較するのは難しいが、表 1-1 によれば、その精度は B/H によらずほぼステレオ画像の地上解像度と相関していることが判る。B/H については、それが大きい場合にはマッチング結果の視差に対する高さ方向の感度が向上するため同じマッチング精度であれば B/H が大きい方が好ましい。一方で地形の起伏が大きい或いは複雑な場合は、B/H の拡大に伴いステレオ画像上での隠匿領域や相対的な歪量が増加するためマッチング精度が低下するというトレー

ドオフを有する。DEM 作成に適した B/H の範囲は、一般に 0.5~0.9 程度と考えられているが [Hasegawa, 2000], 表 1-1 の各センサによる DEM の精度が B/H に大きく依存しないのはこのトレードオフに因るものと考えられる。また、これら検証結果は、基本的に評価対象の DEM に明らかなシステムノイズが存在しないことを前提としていることから、ほぼ画像マッチングによるランダムノイズが寄与した結果と考えることができる。すなわち、衛星光学センサによる DEM のランダムノイズは、センサのラジオメトリック性能や対象地域特徴に沿ったばらつきはあるが、標準的にはステレオ画像の地上解像度に依存したその 2 倍程度の標準偏差を持つと考えられる。各センサの画像地上解像度に対する DEM 高さ精度の関係について図 1-2 に示す。

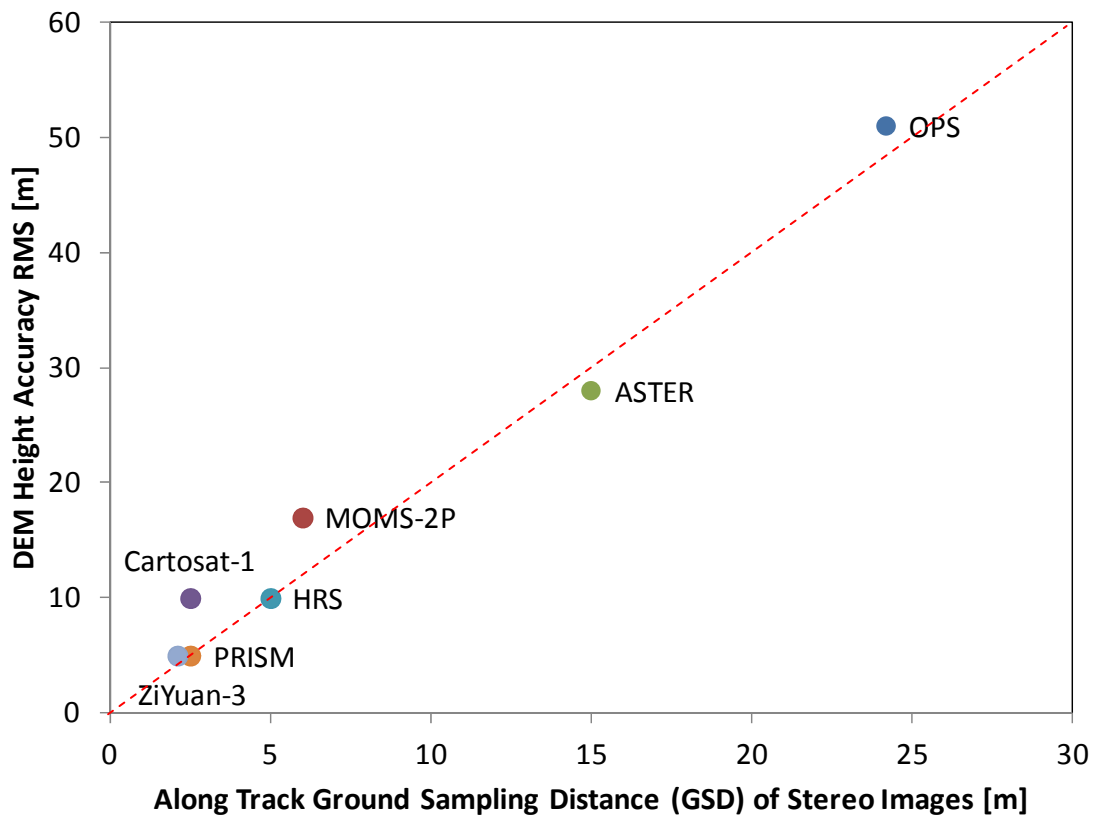


図 1-2 画像の地上解像度(GSD)に対する DEM 高さ精度(RMS)の関係

図中の点線は、 $RMS = 2 \times GSD$

(ステレオ画像の S/N, MTF および姿勢ジッタなどシステムノイズの影響を除く)

1.2 本研究の目的

本研究では、世界のグローバル DEM 作成ミッションにおいて利用されている衛星光学センサについて、作成される DEM 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う。本研究の特色を以下に挙げる。

- 衛星の姿勢振動に伴うシステムノイズの解析と低減手法の提案
- 画像マッチングに伴うランダムノイズの解析と低減手法の提案
- 適用対象として高い精度・解像度を持つ PRISM による衛星 DEM を使用
- 次世代衛星に対する上記手法の適用可能性の確認

本研究では、提案手法の適用対象として、光学衛星グローバル DEM の中で現状比較的高い解像度 (5 m)・精度 (~5 m RMS) を持つ PRISM による DEM を使用する。

PRISM はグローバルマッピングを主要なミッションとして打ち上げられた ALOS 衛星搭載の光学ステレオセンサであり、GCP などの基準点を用いずに高い幾何精度を実現することを目的として、そのシステムノイズの主な要因となる衛星位置・姿勢に対し比較的高い精度で計測を行うセンサが搭載された。但し、衛星姿勢については、太陽電池パドル、姿勢制御用リアクションホイール、中継衛星通信用追尾可動アンテナなどのバス機器や、PRISM と共に ALOS に搭載された AVNIR-2 のポインティング機構といった、軌道上で機械振動を発生させるような衛星搭載機器によるジッタの発生が懸念されていた [Iwata, 2009]。前節で述べたように、衛星の光学ラインセンサの姿勢ジッタは、センサの幾何情報のシステムノイズとして問題となることが多いが、その姿勢センサの計測誤差が DEM の精度に与える影響についてはこれまで十分に解析されているとは言えない。よって、PRISM の姿勢ジッタとその DEM のシステムノイズとの関係について、PRISM を対象として解析することで得られる知見は、現在よりもより今後の衛星光学センサによる DEM 作成ミッションにおいても有用となることが期待される。

一方、PRISM の画像分解能は 2.5 m であり、Cartosat-1 の 2.5 m、ZiYuan-3 の 2.1 m などと比べても近年の光学衛星 DEM ミッションのセンサとしてはほぼ標準的な地上分解能によりステレオ画像を取得した。一方、それら DEM のランダムノイズも表 1-1 のとおり画像の地上解像度に基づくマッチング誤差に沿ったものとなっていることが確認されている。本研究では、上記画像分解能によって制限された DEM の精度をより高めるために、DEM におけるノイズの地形や地域依存性について解析し、グローバル DEM 作成のアルゴリズムで採用されているエリアマッチングにおいて特に問題となる低信頼エリアのノイズを効果的に低減するための手法を検討する。

最後に、これまでの 2.0~2.5 m 程度の地上分解能から今後 1 m 以下といったサブメータ級の地上解像度を持つことが予想される将来の光学衛星 DEM 作成ミッションのステレオ画像について、シミュレーション画像を基に DEM 作成を行い、上記ランダムノイズ低減のためのフィルタを適用することでその汎用性、有効性を確認する。

1.3 本研究の独自性

本研究では, ALOS 搭載の PRISM を題材として衛星光学センサ由来 DEM の一般的なノイズの傾向を確認し, 特に衛星姿勢ジッタに係るシステムノイズとして現れる DEM の周期ノイズについて, 比較的低周波な場合および高周波な場合のそれぞれ特性の違いに応じた低減方式について提案を行った。光学ステレオ画像のマッチング精度に依存した DEM のランダムノイズについては, 低信頼エリアのフィルタ処理について, 自然画像のフィルタ処理として提案されているノンローカルカーネルを用いた新たな手法を開発しその有効性を評価した。また, 本フィルタについて, 光学衛星を用いた DEM の将来ミッションなどで想定されるより高解像度なシミュレーションデータを作成し適用することで, その汎用性・将来性について確認した。

1.4 本研究の構成

本研究の構成を図 1-3 に示す。

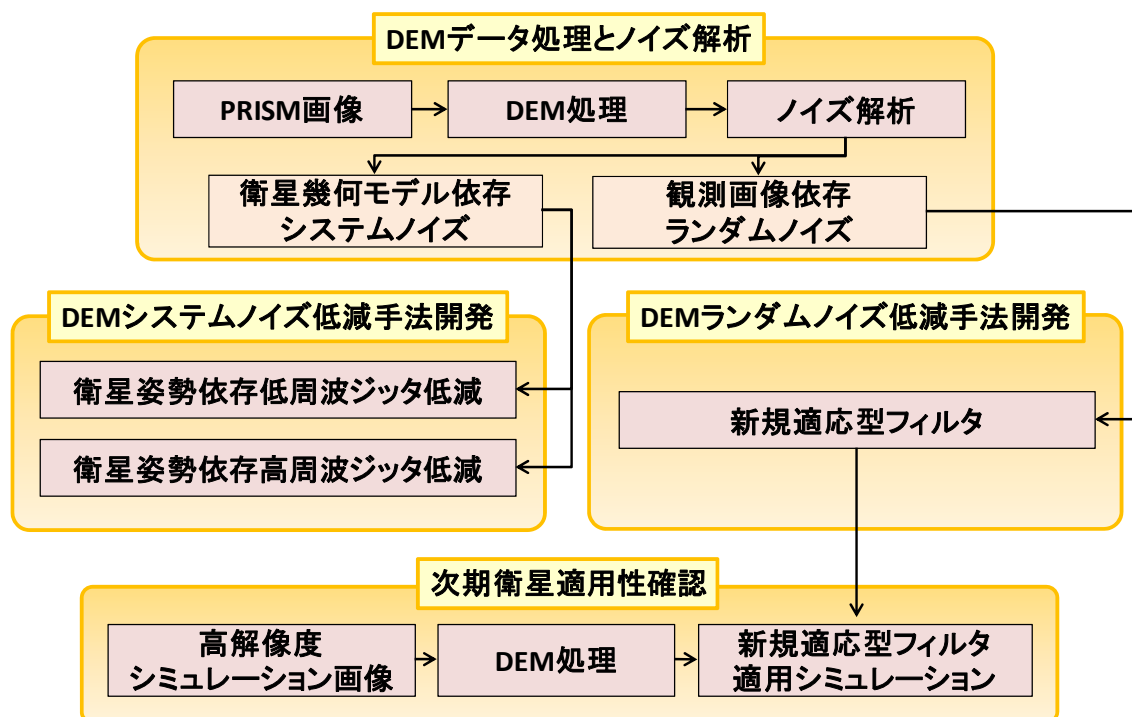


図 1-3 本研究の構成の概略

第2章では、PRISMによるDEMデータ処理とノイズ解析について述べる。伝統的な写真測量に基づく処理方式に対してPRISMの特徴に応じて適用した三方向視画像のステレオマッチングを含むDEM作成アルゴリズムの概要、および作成DEMのシステムノイズ、ランダムノイズの解析結果について示す。

第3章では、姿勢ジッタに係るDEMのシステムノイズ低減手法について、ジッタが比較的低周波な場合と高周波な場合の2つのケースについて述べる。まずジッタが低周波な場合について、7 Hz程度の姿勢振動に由来した約1 km周期のノイズに対し、姿勢データを更新或いは修正することにより低減する方式について述べる。次いで、高周波な場合について、60 Hz程度の姿勢振動に由来した約100 m周期のノイズに対し、後処理として適用したウェーブレットフィルタの詳細および効果について述べる。

第4章では、DEMのランダムノイズについて、ノンローカルフィルタを応用して開発した新たな適応型フィルタの詳細およびノイズ低減の効果について述べる。

第5章では、まず将来衛星ミッションで予想されるより高解像度な光学ステレオセンサによる観測データを航空機観測データからシミュレートする方式について述べ、次い

で、これらシミュレーションデータから作成した DEM に対する上記提案フィルタの適用とその効果について述べる。

第6章では本研究を総括した結論について述べる。

第2章 DEM データ処理とノイズ解析

2.1 ALOS/PRISM を用いた DEM データ処理

本章では、始めに PRISM による DEM データ処理の概要について述べる。PRISM は、第 1 章で述べたとおり、2.5 m の地上解像度（ピクセルスペーシング）により波長帯 0.52 ~ 0.77 μm のパンクロマチックデータを観測幅 35 km で観測する光学ラインセンサを用いて、軌道方向の三方向視（前方視・直下視・後方視）或いは二方向視（直下視・後方視）による常時ステレオ観測を 2006 年の打ち上げから 2011 年まで約 5 年間にわたって行った [Tadono *et al.*, 2009, 2014]。ステレオ視の B/H については、前方視と後方視がそれぞれ直下視に対して 0.5 となるように、衛星直下方向から進行方向にそれぞれ 23.8° 傾けて設置された。全球における観測データのグローバルアーカイブは、PRISM のアーカイブ単位である約 35 km x 35 km のシーン単位で行われたが、その数は宇宙航空研究開発機構（JAXA）での DEM 作成の基準となる雲量 30% 以下のもので約 300 万シーンである [Tadono *et al.*, 2014]。

本研究で使用した PRISM による DEM データ処理のアルゴリズムは、基本的には伝統的な写真測量の方式に沿って独自に開発されたものであり、ALOS 衛星の軌道・姿勢計測データ、および PRISM センサモデルなどの幾何情報を適用した空中三角測量を、観測ステレオ画像のマッチング処理を介して行う機能を有する [Takaku *et al.*, 2009a]。なお、本研究を行うに当たり使用した PRISM データおよび参照データは、JAXA より提供を受けたものである。

2.1.1 DEM データ処理概要

PRISM から DEM を作成するアルゴリズムは、PRISM の 2.5 m の地上解像度に対して 5 m グリッド或いは 10 m グリッドの DEM を 35 km 四方のシーン単位で処理するものである。アルゴリズムの概略フローについて図 2-1 に示す。

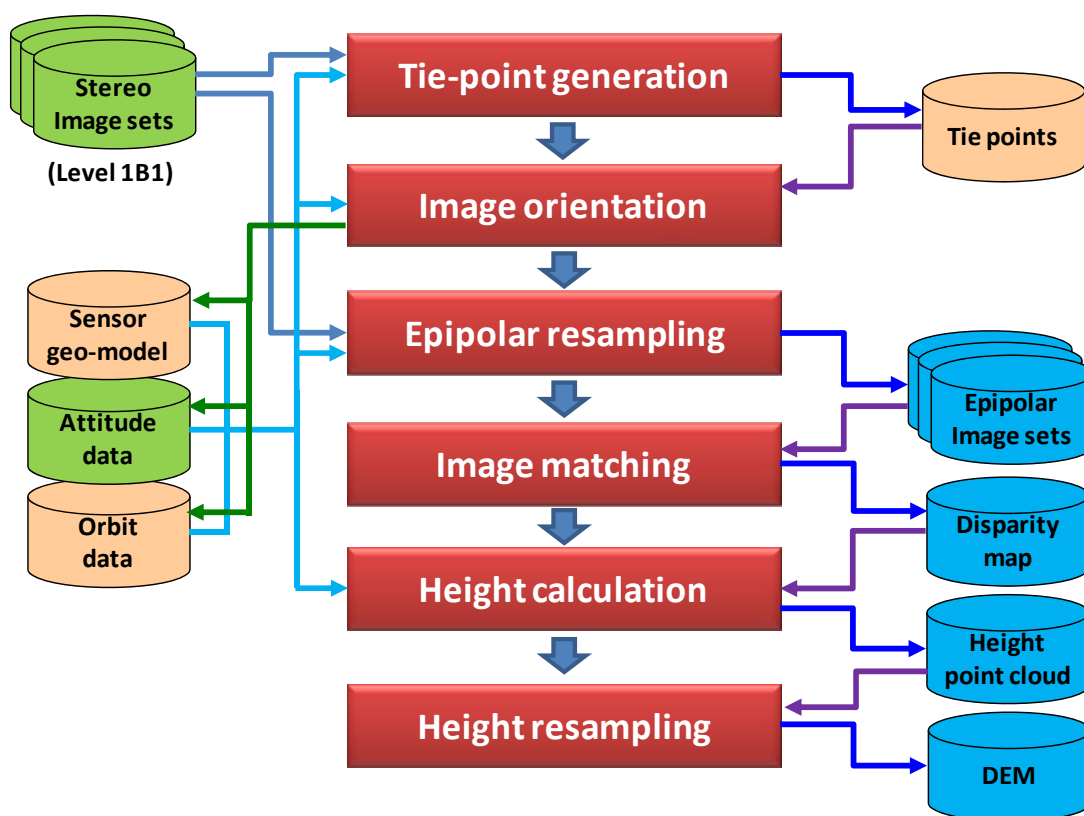


図 2-1 PRISM からの DEM 作成アルゴリズム概略フロー

DEM 処理の流れとしては、まずステレオ画像間で同一の対応点を特徴点マッチングにより規定数取得するタイポイント抽出 (Tie-point generation) およびそれらを参照データとして行う標定処理 (Image orientation) により、ステレオ画像間の幾何モデル情報である標定パラメータの相対的な誤差を修正し空中三角測量における相対ステレオモデルを決定する。ここで、標定パラメータとしては、センサ取り付けアライメント以外の校正済み PRISM センサモデル (Sensor geo-model) 静的成分、および絶対精度の高さが別途保障されている GPSR 衛星位置 (Orbit data) の計測値は対象外とし、基本的には STT と IRU およびセンサ取り付けアライメントによる衛星姿勢 (Attitude data) 計測誤差についてのみ修正すれば良いことが確認されている [Takaku *et al.*, 2009a]。また、本標定処理は、GCP を使用しない相互標定であり、一般的には GCP を使用した絶対標定による絶対誤差の修正が別途必要になるが、PRISM の相互標定モデルにおける絶対誤差は基本的に高さ方向のソフトバイアスのみであり、SRTM や ICESat データなどのグローバルな絶対高さ基準値を用いた後処理にて補正可能である [Takaku *et al.*, 2009b, 2013, 2014]。但し、本標定処理では、取得できるタイポイント分布および衛星進行方向の並行投影に伴うタイポイントの交会条件に係る制約により仮に姿勢ジッタのような周期的な誤差成分が存在しても修正ができないため、その影響は最終的な DEM の周期ノイズとして現れることになる。

標定処理後は、これら幾何モデルを用いたステレオ画像のエピポーラ投影（衛星軌道の地上投影にほぼ沿ったステレオ画像間のエピポーラ直線に基づく画像フレームへのステレオ画像のリサンプリング）を行い [Hartley *et al.*, 1994], このエピポーラ画像上で一次元探索による画像マッチング処理を行って視差情報を出力する。画像マッチングの詳細については次節に述べるが、上述の姿勢ジッタはこのエピポーラ投影画像の周期的な歪みに繋がり、算出される視差すなわち DEM の周期ノイズに引き継がれることになる。

得られた視差情報は、ステレオ画像の各幾何モデル情報に基づく視線ベクトルから標高値に変換され、最終的な 5 m / 10 m メッシュ DEM のラスタデータに 1 m の量子化レベルでリサンプリングされる。

2.1.2 ステレオマッチングアルゴリズム

PRISM で用いられるマッチングは、第1章で触れたとおり NCC を類似指標としたエリアマッチングであるが、三方向視画像の扱いとしては、直下視画像上の等間隔グリッドに NCC テンプレートを固定し、前方視、後方視の各画像上における対応点をそれぞれ探索する方式としている [Takaku *et al.*, 2009a]。この際、各方向視の視線ベクトルが標定処理で修正したモデルの誤差範囲で交会するという条件下で、直下視に対する前方視、後方視の各視差がエピポーラ直線上で相互に対称となるという性質を利用し、三方向視の同時探索を行っている。三方向視同時マッチングの概念について図 2-2 に示す。なお、二方向視の場合は直下視と後方視のみが使用される。

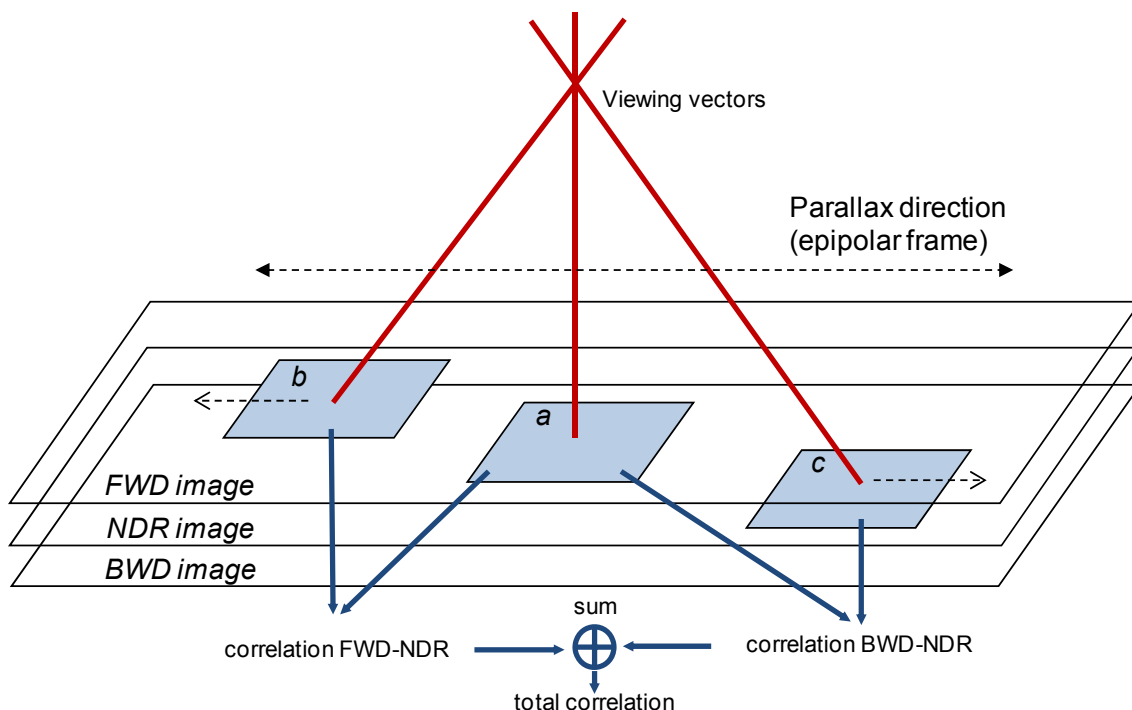


図 2-2 三方向視同時マッチングの概念 [Takaku *et al.*, 2009a を改変]

NCC のテンプレートサイズは、視差を探索するエピポーラ直線上の NCC 値の変動を関数として捉え、その関数の形状に従って自動的に決定する方式を採用している [Takaku *et al.*, 2009a]。これにより、テクスチャが多く且つ周囲に類似パターンの少ないことで関数が鋭い単峯性となる場合は小さいサイズを、逆にテクスチャが少なく関数の明らかなピークが現れない場合や、周囲に類似パターンが多いことで関数が多峯性となる場合には大きいサイズを自動的に設定し、マッチング結果の高精細化と mismatches の減少といったテンプレートサイズに係るトレードオフを解消した。また、視差は三方向視の場合、直下視－前方視と直下視－後方視の NCC 値の合計を類似指標として、探索区間で最も高い値を持つ画素を対応点としている。すなわち NCC 値を ρ とすれば、

$$\rho = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.1)$$

であり、ここで、 N はテンプレート内画素数、 x_i と y_i は比較する二つのテンプレート内の各輝度値、 μ_x, μ_y は各輝度平均値、 σ_x, σ_y は各輝度標準偏差であるが、三方向視の場合の類似度を ρ_{FB} とすれば、

$$\rho_{FB} = \rho_F + \rho_B \quad (2.2)$$

であり、 ρ_F, ρ_B はそれぞれ下視－前方視と直下視－後方視の各 NCC 値である。

サブピクセル視差の算出については、NCC の最大値前後の値を含めた 3 点のパラボラフィッティングによって求めている。すなわち、サブピクセル視差 P_{sub} は、マッチング探索内で最大の類似度 (NCC 値) を示した画素単位の視差 P に対して

$$P_{sub} = P + \frac{\rho_{+1} - \rho_{-1}}{4\rho - 2\rho_{+1} - 2\rho_{-1}} \quad (2.3)$$

にて算出する。ここで、 $\rho_{-1}, \rho, \rho_{+1}$ は 3 点の NCC 値であり三方向視の場合は ρ_{FB} を、また二方向視の場合は ρ_B を使用してサブピクセル値を求める。DEM に発生するランダムノイズは、この画像マッチング精度の揺らぎに依存して発生する。

2.2 DEM データのノイズ解析

DEM データのノイズ解析は、まず姿勢ジッタ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発生傾向の確認を行った。次いで、システムノイズが検知された DEM データについて、そのノイズの傾向および原因について解析を行った。ランダムノイズについては、高精度な参照データを有する検証サイトにおける PRISM のステレオ画像データから DEM 作成を行い、参照データとの比較により解析を行った。

2.2.1 姿勢ジッタによるシステムノイズの検知

姿勢ジッタによる DEM のシステムノイズ検知のためのサンプルとして、日本域を中心とした全球の任意エリアにおける PRISM データ 1905 シーンに対し、10 m メッシュによる DEM 処理を行った。次いで、作成した DEM データの全てについて、その量子化レベルである 1 m 程度までの振幅によるジッタが目視検出できるように 100 m 単位の相対的な高さの違いを 256 階調のグレースケールで表現した白黒画像を作成し、目視によりジッタの有無を確認した。結果として、PRISM から作成した DEM には衛星進行方向沿って以下に示す 2 種類の周期ノイズが発生していることを確認した。

- ・約 1 km 周期のノイズ (1 km ジッタ) 346 シーン (発生率 18%)
- ・約 100 m 周期のノイズ (100 m ジッタ) 498 シーン (発生率 26%)

1 km ジッタおよび 100 m ジッタが検出された DEM のそれぞれ 1 サンプルについて、高さをグレースケールとして表示した画像を図 2-3, 図 2-4 に示す。

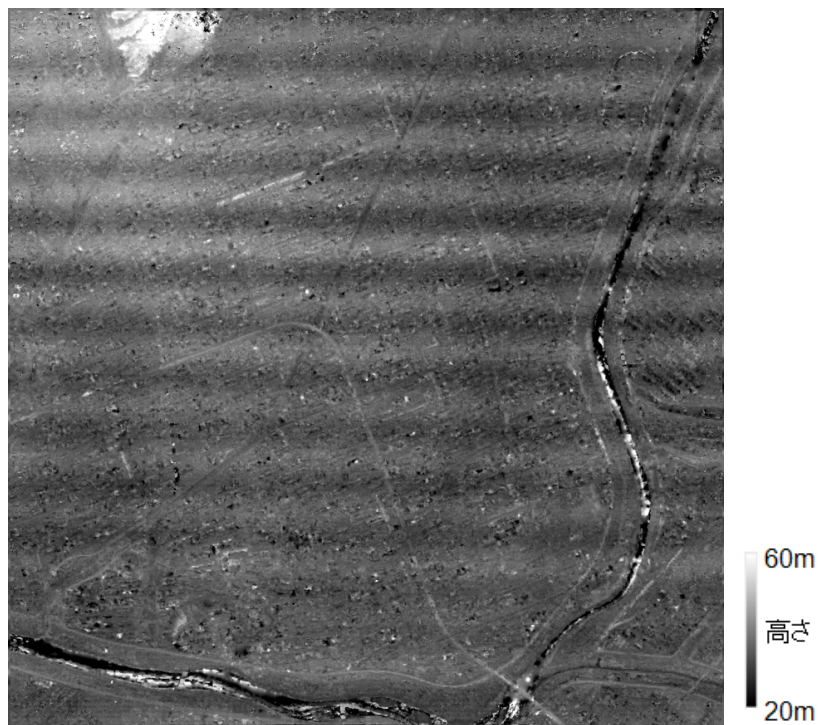


図 2-3 DEM の 1 km ジッタサンプル (12km x 12km)
(2009/9/23 北海道札幌付近観測の PRISM 二方向視ステレオシーンから作成)

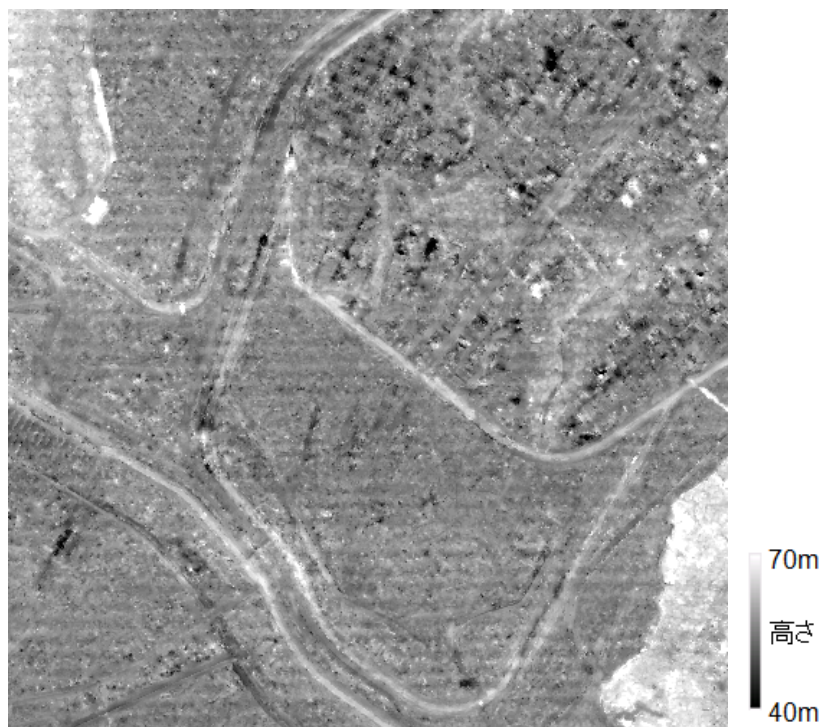


図 2-4 DEM の 100 m ジッタサンプル (3 km x 3 km)
(2007/1/31 埼玉県北部観測の PRISM 三方向視ステレオシーンから作成)

なお、DEM の目視によるジッタの確認は地形としてある程度の広さのフラットなエリアが存在していることが必要であり、このような地形が存在しないシーンはジッタが発生していても目視にて検知できない。すなわち実際にジッタが発生しているシーンは上記数値よりも多い可能性がある。

ジッタの地上観測位置に依存した傾向を示すデータとして、1 km ジッタを検知したシーンの全世界地図上位置プロットを全評価シーンの位置プロットと併せて図 2-5 に示す。また同じく、100 m ジッタを検知したシーンの全世界地図上位置プロットを図 2-6 に示す。

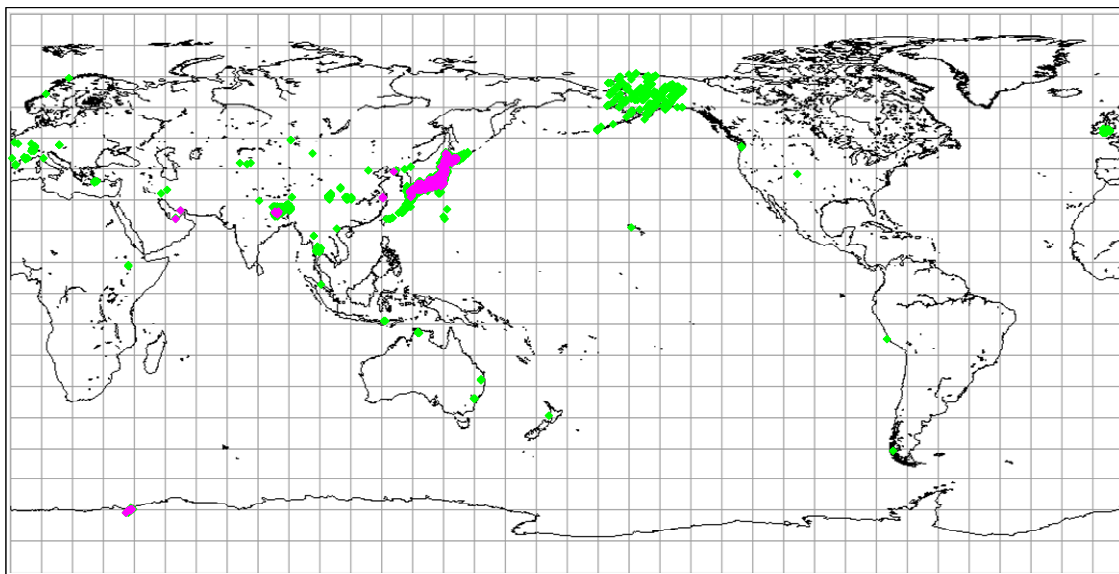


図 2-5 全評価シーンに対する 1 km ジッタ発生位置の分布
緑=1 km ジッタ無し(1559 シーン)/ ピンク=1 km ジッタ有り(346 シーン)

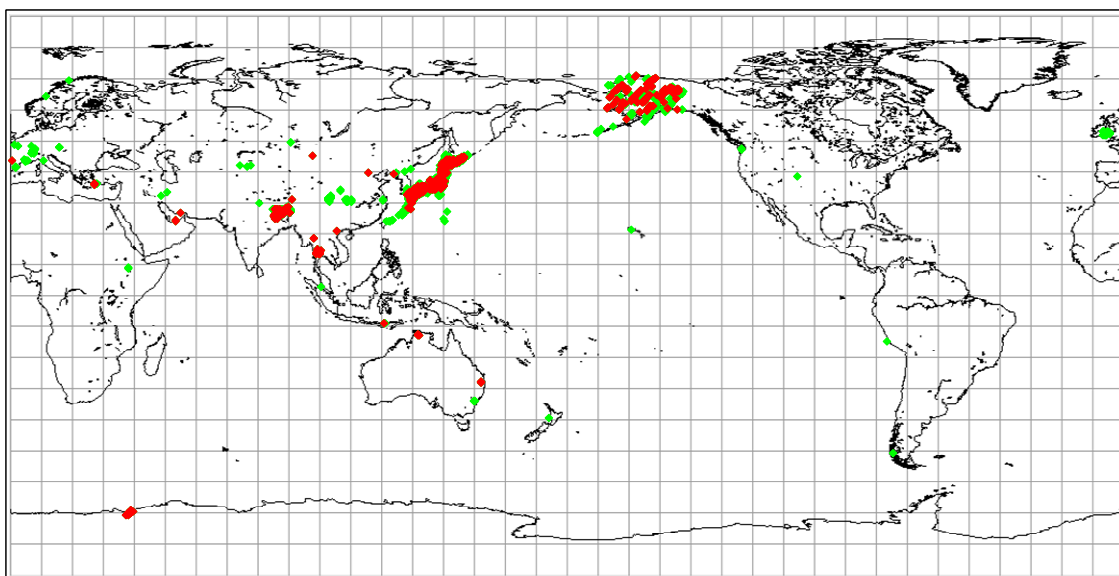


図 2-6 全評価シーンに対する 100 m ジッタ発生位置の分布
緑=100 m ジッタ無し(1407 シーン)/ 赤=100 m ジッタ有り(498 シーン)

図 2-5, 図 2-6 によれば, 1 km ジッタに比して 100 m ジッタの発生の方が広く分布していることが確認できる。これは各ジッタのそれぞれ衛星上の姿勢ジッタ発生源に起因すると考えられる。ここで衛星の対地速度は約 7 km/s であることから, 1 km ジッタ, 100 m ジッタの周波数はそれぞれ 7 Hz, 70 Hz 程度であり, 過去に報告のあった 8 Hz,

93Hz 程度のジッタ [Bignone *et al.*, 2008] に対してやや帯域は低いもののほぼ同等のものとして検出されている。衛星上において PRISM の光学系にこれら周波数帯の振動を及ぼす機器としては、ダウンリンクデータの衛星間通信用可動アンテナ (Data Relay Communication antenna: DRC) の駆動が 3~10 Hz のジッタ発生を伴うものとして挙げられており、1 km ジッタはこの DRC 駆動による姿勢ジッタの計測誤差が起因していると考えられる [Iwata *et al.*, 2009]。DRC は、データ中継衛星がインド洋上空の静止軌道に位置していたことから、東経約 10~170° の範囲における PRISM データほぼ全シーンの観測中に稼働していたが、図 2-5 による 1 km ジッタ発生シーンはほぼこの範囲内に含まれることも上記を裏付けている。一方、衛星飛行中に常時稼働していた姿勢制御用リアクションホイールによる振動が 0.001 Hz 付近から 100 Hz を超える広い周波数帯に分布することが示されており、100 m ジッタについては、本振動の高周波域の計測誤差などがその原因と推定される。

各ジッタ発生の観測期間に依存した傾向を示すデータとして、作成したシーン数とそ
 の中で各ジッタの確認されたシーン数の内訳を打ち上げからの軌道周回数 1000 ごとに
 集計したものを図 2-7 に示す。なお ALOS 衛星は地球の極軌道を一日約 14 周するが、
 軌道周回数の 5000, 10000, 15000 は、衛星打ち上げ年/月/日の 2006/1/24 に対してそれぞ
 れほぼ観測年/月/日の 2007/1/2, 2007/12/11, 2008/11/18 に該当する。

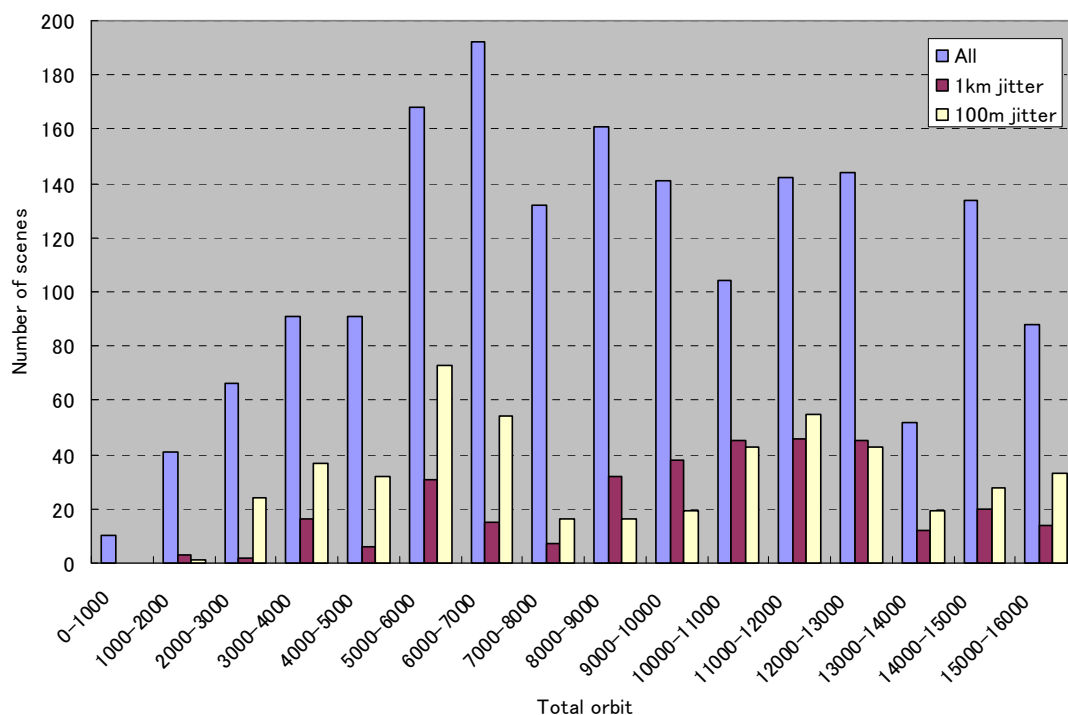


図 2-7 軌道周回数 1000 毎の作成 DEM シーン数及び各ジッタ発生シーン数

図 2-7 によるとほぼ処理シーン数に比例した数の各ジッタが確認されており、特に観測期間に依存した傾向は見られなかった。

すなわち、PRISM から作成した DEM におけるジッタノイズの傾向としては、推定される衛星上の姿勢ジッタ発生源に従ってその発生の位置範囲はある程度限定されるが、発生の時間的な分布についてシステムチックな傾向は無く、ある一定の割合で含まれていることが判った。

2.2.2 姿勢ジッタによるシステムノイズの解析

1 km ジッタおよび 100 m ジッタの詳細な振幅や空間周波数について、それぞれジッタノイズが確認されたサンプル DEM (10m メッシュ) の衛星進行 (Along Track: AT) 方向における高さプロファイルおよび FFT 解析により確認した。1 km ジッタ、および 100 m ジッタの確認に使用したサンプルは、2009/9/23 に北海道札幌付近を観測した PRISM 画像、および 2007/1/31 に埼玉県北部を観測した PRISM 画像、によるそれぞれ DEM である。

1 km ジッタ、100 m ジッタの各サンプル DEM について、比較的フラットな地形エリアの高さプロファイル水平位置および高さプロファイルをそれぞれ図 2-8、図 2-9 に示す。なお 1 ラインのみのプロファイルではランダムノイズの影響により波形の確認が難しいため、各図の DEM グレースケール表示画像に示した矩形エリアの AT 方向の各高さ値として、その直交方向 (Cross Track: CT) 方向 100 カラムの平均値を使用した。

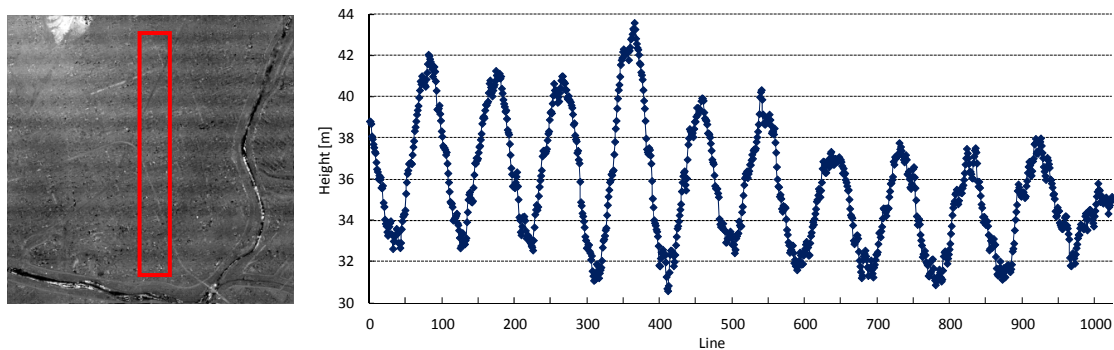


図 2-8 1km ジッタの高さプロファイル位置 (左図赤線) および高さプロファイル

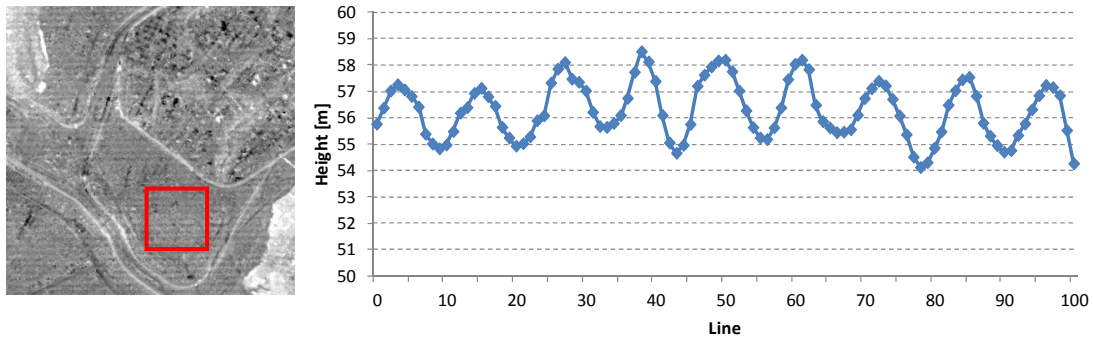


図 2-9 100m ジッタの高さプロファイル位置（左図赤線）および高さプロファイル

図 2-8 によれば，1 km ジッタの振幅はおおよそ 3~6 m 程度で推移しているが，必ずしも一定ではない。また波形も滑らかな正弦波ではなく多少のステマチックな傾向がみられる。一方，図 2-9 によれば，100 m ジッタの振幅はおおよそ 1~2 m 程度で推移しており 1 km 同様に一定でないことが判る。

次に，FFT 解析として各ジッタ成分の振幅スペクトルを算出した。FFT は AT 方向の N ラインについて FFT を行い，その振幅スペクトルについて，CT 方向 M カラムの平均値を算出した。すなわち，FFT 振幅スペクトル平均を $A(\omega)_{ave}$ とすると，

$$A(\omega)_{ave} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |F(\omega)_m| \quad (2.4)$$

$$F(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-j\omega n} \quad (2.5)$$

であり，ここで $f(n)$ はライン n の DEM の高さ， ω は DEM の AT 方向周期の角速度 (cycle/ N)， $F(\omega)$ は $f(n)$ のフーリエスペクトルである。ここで， N ， M について，1 km ジッタでは $N=1024$ ， $M=500$ ，100 m ジッタでは上述の理由によるノイズ混入を防ぐ目的でそれぞれ倍の $N=2048$ ， $M=1000$ とした。各 DEM の該当ジッタを含む帯域付近における FFT 振幅スペクトルについて図 2-10，図 2-11 に示す。

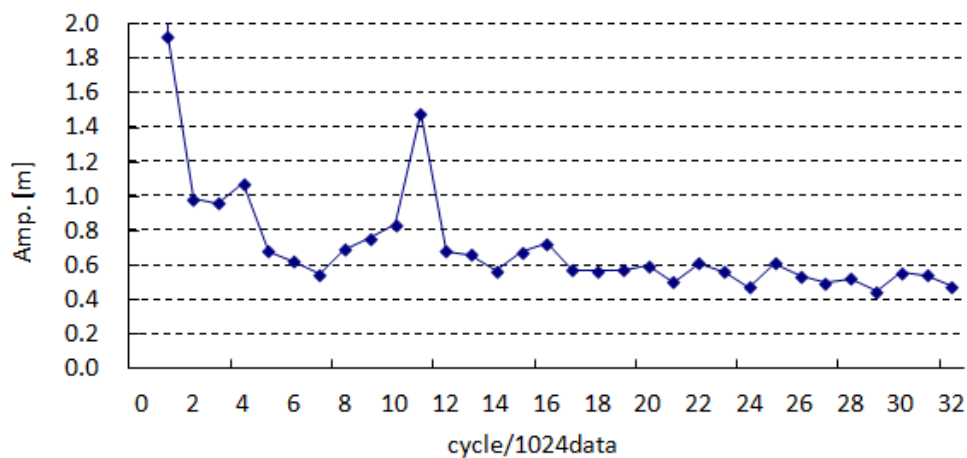


図 2-10 1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均

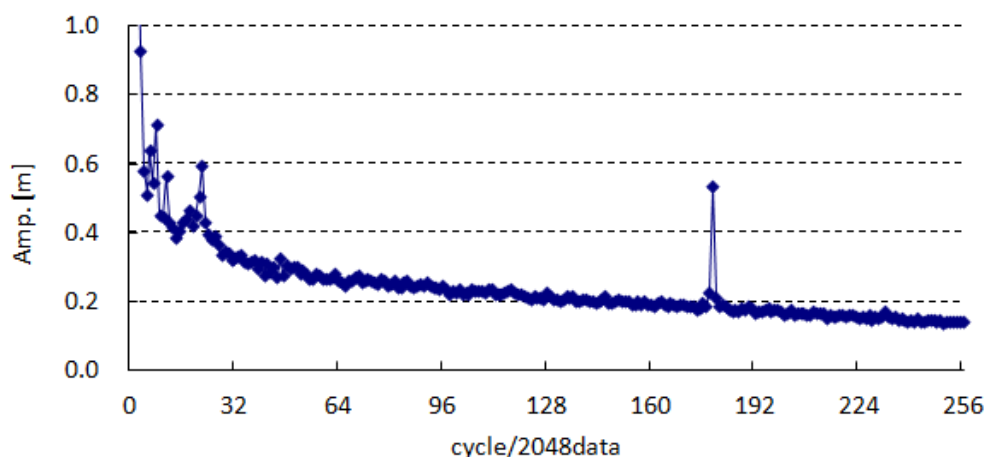


図 2-11 100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均

図 2-10 によれば、11 cycle に約 1.5 m のピークがあり、その周期は DEM のメッシュサイズが 10 m であることから $1024 / 11 \times 10 \text{ m} = 931 \text{ m}$ 程度と見込まれる。一方、図 2-11 によれば、179 cycle に約 0.6 m のピークを読み取ることができ、その周期は 1 km の場合と同様に $2048 / 179 \times 10 \text{ m} = 114 \text{ m}$ 程度と見込まれる。これら周期の 931 m、114 m について、衛星の対地速度である 6.9 km/sec を用いて周波数に換算すると、それぞれ約 7.4 Hz、60.5 Hz となる。なお、各ジッタの振幅のピークは図 2-8、図 2-9 から読み取れる値よりも低く出ているが、これはジッタのプロファイルが厳密には正弦波でないことにより、FFT のピーク周囲のスペクトルに DEM の周期変動成分のパワーが分散しているためと思われる。

総じて、PRISM の姿勢に関しては、同じ光学ステレオ観測機構を持つ ASTER で検出されている 1.5 Hz、および ZiYuan-3 で検出されている 0.62 Hz などに対してより高周波

である 7 Hz, 60 Hz といった帯域において、最大でそれぞれ 6 m, 2 m といった DEM の明らかなシステムノイズに寄与するジッタノイズが含まれていることが確認された。ここで、ALOS の標準姿勢データとして提供される STT と IRU による姿勢計測値のサンプリング周波数は 10 Hz であり、そのナイキスト周波数は 5 Hz であることから、DEM に生ずるジッタノイズの原因は基本的にこの標準姿勢データのサンプリング不足に因るものと考えられる。これら姿勢データとジッタノイズの関係に係る詳細な解析とその修正手法については第3章に述べる。

2.2.3 ランダムノイズの解析

PRISM から作成した高さ精度の指標が 5 m RMS の DEM のランダムノイズを計測するに当たっては、25 cm RMS の高さ精度を有する航空機 LiDAR 計測の 1 m メッシュ DEM (LiDAR/DEM) を参照データとして用いた。使用した LiDAR/DEM は 2007 年 1 月に筑波山山頂及びその北東に連なる山脈とその北西の水田域および市街地を含む 8 km x 8 km を計測したものであり標高範囲は約 0~900 m である。なお、DEM のランダムノイズは、前述の通り対象エリアの地形起伏や土地被覆などの地域特徴に依存するため、参照データに該当する地域から PRISM 直下視画像に基づき表 2-1 のカテゴリー分類に基づくエリアを個別に選択して評価を行った。すなわち LiDAR/DEM の範囲から 4 つのカテゴリーについて 1 km x 1 km の矩形エリアを各 2 箇所指定し、それぞれ評価エリアとした。図 2-12 に該当エリア PRISM 直下視画像および各評価エリアについて示す。図 2-13 に LiDAR/DEM の陰影図 (Shaded Relief) を示す。なおここで陰影図とは、疑似光源により地形の起伏を斜面の陰影表現したものであり、地形データの品質目視確認に適した画像表現手法として汎用的に利用されている図法である [Castner *et al.*, 1979]。なお、本研究では、疑似光源のパラメータとして仰角=60° , 方位角=北から時計回りに-45° を用いた。

表 2-1 DEM のランダムノイズ評価の参照 LiDAR における種別

種別	地盤地形	テクスチャ
Paddy	フラット	小
Village	フラット	大
Forest	中勾配	中
Mountain	急峻	中

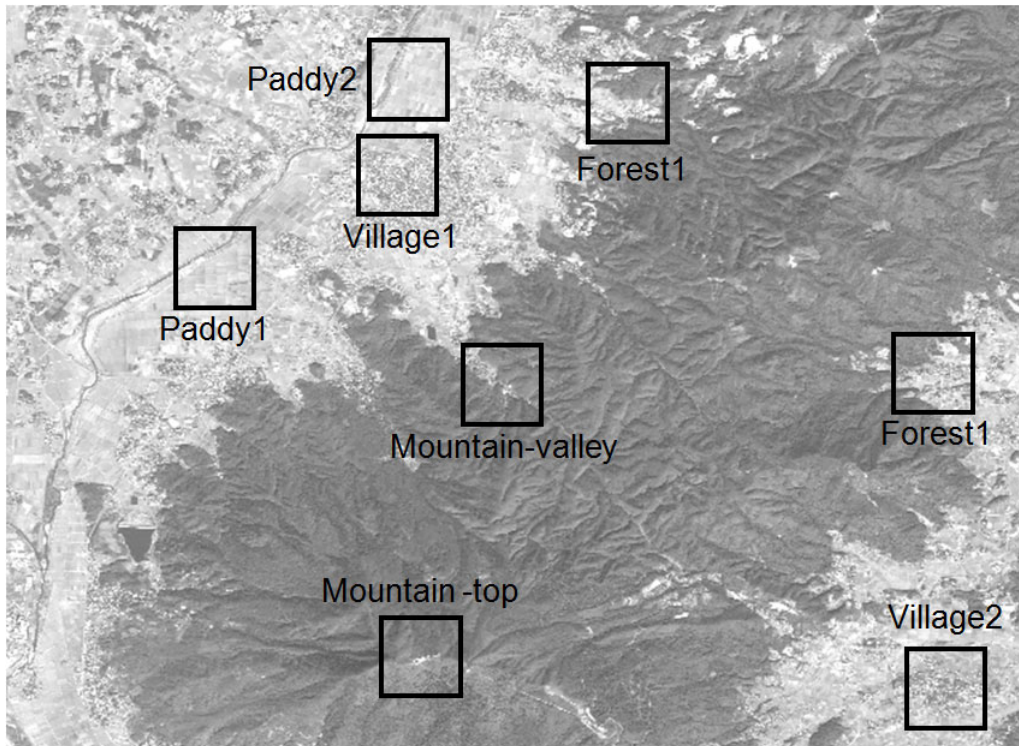


図 2-12 LiDAR/DEM エリアの PRISM 直下視画像と評価エリア



図 2-13 LiDAR/DEM の陰影図 (Shaded Relief) 画像

確認に使用した DEM は、2007/3/1 に参照データエリアを観測した PRISM 三方向視ステレオ画像から作成したものであり、姿勢ジッタの影響は受けていないことを事前に確認している。評価は、1 m メッシュの LiDAR/DEM について、PRISM から作成した 5 m メッシュ DEM の各メッシュ中心の水平位置座標に該当する高さの値をリサンプリングにより求め、それぞれの高さの差を誤差として計測した。評価結果の誤差統計値として算出した評価エリア毎の平均 (Ave.)、標準偏差 (S.D.)、RMS、最大 (Max.)、最小 (Min.) について表 2-2 に示す。また、評価エリア毎の 1 m 間隔による誤差ヒストグラムについて図 2-14 に示す。

表 2-2 PRISM/DEM と LiDAR/DEM の高さの差の統計値 (単位:m)

Area	Points	Ave.	S.D.	RMS	Max.	Min.
Whole	5155801	-1.16	4.75	4.89	38	-110
Paddy1	40000	0.07	2.99	2.99	18	-20
Paddy2	40000	0.52	3.81	3.85	26	-31
Village1	40000	0.25	3.00	3.01	15	-21
Village2	40000	-0.16	3.19	3.19	16	-22
Forest1	40000	-0.70	3.58	3.65	19	-24
Forest2	40000	-0.52	4.32	4.35	18	-30
Mountain top	40000	-1.51	5.27	5.48	31	-38
Mountain valley	40000	-2.37	5.40	5.89	21	-32

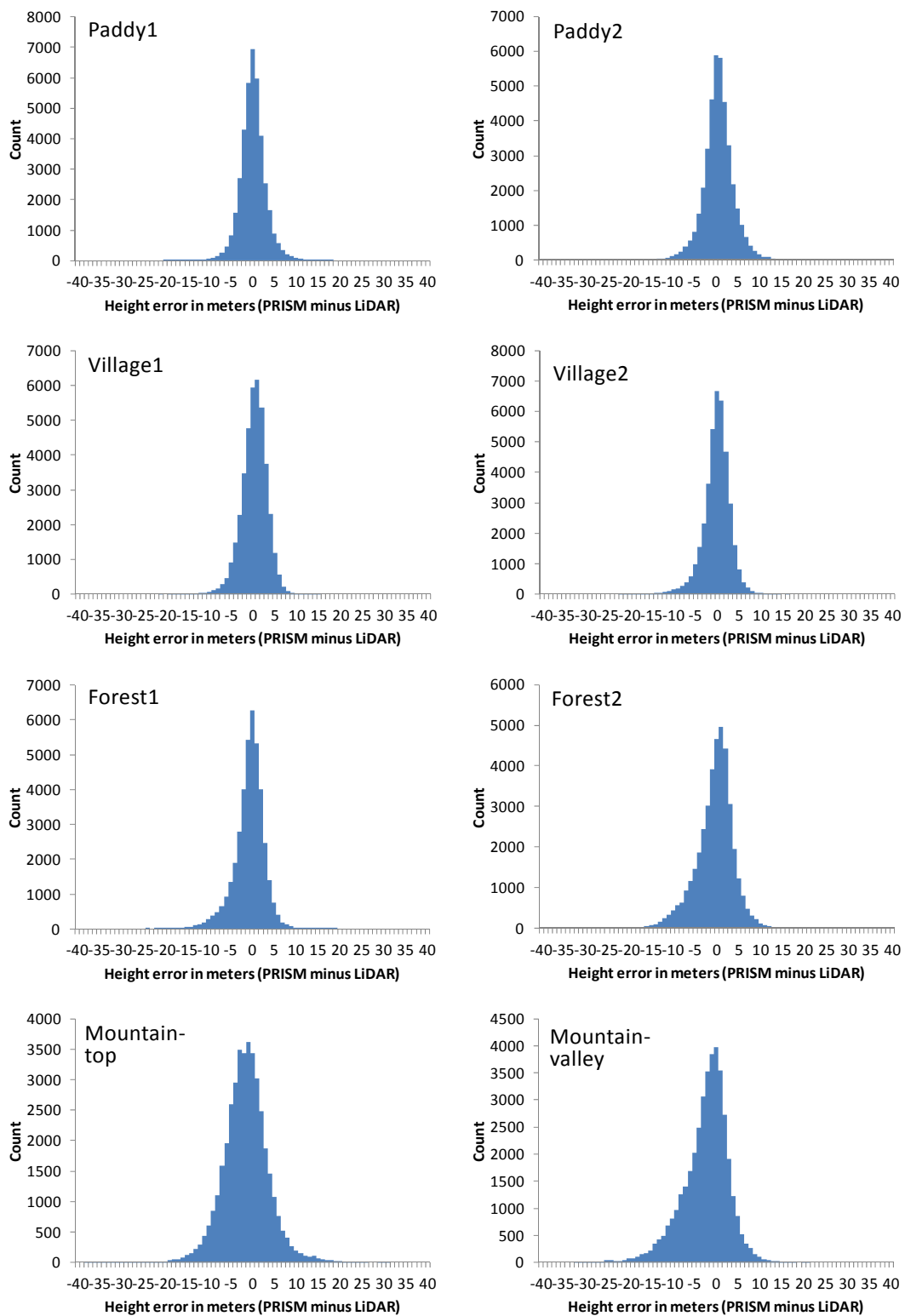


図 2-14 PRISM/DEM と LiDAR/DEM の高さの差のヒストグラム

表 2-2 によれば、LiDAR/DEM を参照データとした PRISM/DEM の誤差標準偏差は、比較的フラットな地形を対象とした Paddy で約 3~4 m、小規模な建物などを含む Village で約 3 m、森林を含む Forest で約 3~4 m、森林に覆われた Mountain で約 5 m となっていることが確認できる。一方、図 2-14 のヒストグラムによれば、Paddy における誤差はほぼ正規分布に沿っており、ステレオ画像マッチングのランダム誤差に由来していると考えられる。Village, Forest, Mountain では、誤差の分布がそのピークに対して僅かに非対称となっており、微細なシステム誤差の傾向がみられる。Village における建物の高さなどは、比較した DEM のメッシュサイズの違いに伴う建物壁面などのエッジ水平位置の違いや、前方視・後方視から見て建物の陰に当たるオクルージョンエリア（隠匿領域）のマッチング精度の低下が高さの微細なシステム誤差に影響していると考えられる。また、Forest, Mountain における森林の樹冠高は、上記建物の場合同様のオクルージョンの問題と併せて、樹木の密度や樹種などによって元来高さの定義が困難なことも一つ根本的な問題としてあるが、これと関連した LiDAR と光学ステレオの各計測システムの違いに伴う樹冠高計測値の差もシステム誤差として含まれていることが予想される。ここで、オクルージョンによるシステム誤差の寄与分が PRISM の三方向視ステレオによるマッチングでは比較的少ないことを考慮すると、Village, Forest, Mountain における僅かなシステム誤差については、ほぼ参照データの制約に即したメッシュサイズや地物形状に係る計測システムの違いに伴うものであると予想される。

上記を総合すると、PRISM から作成した DEM について、純粋なマッチング精度から由来するランダムノイズは Paddy エリアなどで確認された 3~4 m (σ)程度であると思われる。高さ精度指標の 5 m RMS においてシステム誤差が存在しない場合（誤差平均が 0 の場合）および、第 1 章に述べた画像解像度の約 2 倍といった指標にほぼ沿った結果となっている。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。特に、衛星由来のグローバル DEM データの比較的平坦なエリアにおけるランダムノイズは、水害予測のための流出解析などの DEM データ利用分野で大きな問題となることが指摘されており、そのノイズ低減が有用となる可能性は大きい [Fukami *et al.*, 2011]。これら主に平坦域のノイズ低減を目指した後処理の方式については第 4 章で述べる。

第3章 DEM システムノイズ低減手法の開発

3.1 姿勢ジッタノイズの解析

DEM の周期ノイズに寄与する姿勢ジッタ計測誤差は、センサに固定した三次元座標系におけるオイラー角（ロール、ピッチ、ヨー）の中で、DEM の高さ誤差に直接的な影響を与えるピッチ角の誤差成分と間接的な影響を与えるロール角の誤差成分に分類される。なおヨー角については、その角度誤差に対する地上位置精度および高さ誤差への感度がピッチ角、ロール角に対して非常に小さいため対象から除外することができる。図 3-1 に、前方視 (Forward-viewing: FWD)、直下視 (Nadir-viewing: NDR)、後方視 (Backward-viewing: BWD) による三方向視ステレオモデルにおけるセンサ姿勢の概念について示す。

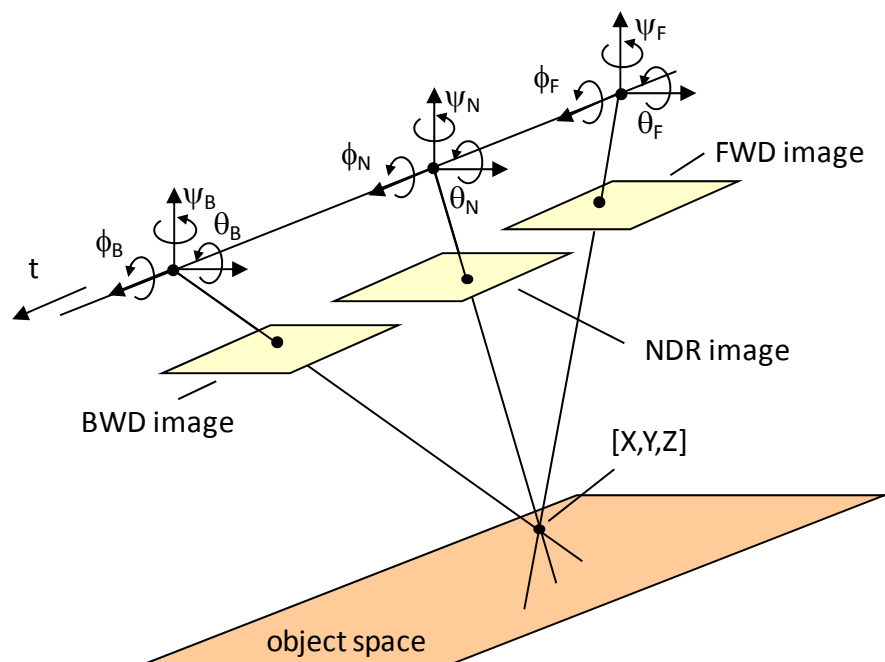


図 3-1 三方向視ステレオモデルにおけるセンサ姿勢の概念
 ϕ_i : ロール角, θ_i : ピッチ角, ψ_i : ヨー角
 (I: F=FWD(前方視), N=NDR(直下視), B=BWD(後方視))

3.1.1 姿勢ジッタと DEM のノイズとの関係

姿勢ピッチ角の誤差成分を初期位相が一定の正弦波と仮定すると、直下視画像で観測した任意ターゲットの時刻 t での DEM の高さ方向周期ノイズ $h_e(t)$ は、直下視画像および斜め視画像のそれぞれピッチ角のジッタ誤差振幅 A_{PN} , A_{PS} がステレオ角 ($=\tan^{-1}(B/H)$) に

対して十分小さいと仮定して近似的に以下のように表わすことができる。

$$h_e(t) = H \cdot \tan(A_{PN} \cdot \sin(\omega t - \varphi_0) - A_{PS} \cdot \sin(\omega(t + \Delta t) - \varphi_0)) / (B / H) \quad (3.1)$$

ここで、 Δt は斜め視画像ターゲットの直下視画像ターゲットに対する観測時刻差、 H は衛星高度、 ω はピッチ角ジッタ誤差周期の角速度、 φ_0 はピッチ角ジッタ誤差周期の初期位相である。すなわちピッチ角のジッタ誤差の位相は DEM で観測される周期ノイズの位相に沿ったものとなる。ピッチ角のジッタ誤差に該当する DEM 高さ周期ノイズの振幅は、ジッタ誤差の振幅 A_{PN} 、 A_{PS} を基にステレオ画像間の時刻差 Δt により変化するが、その最大値及び最小値を与える Δt は以下となる。

$$\arg \max_{\Delta t} \int_0^T |h_e(t)|^2 = \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{\omega} \mid n \in \mathbf{Z} \right\} \quad (3.2)$$

$$\arg \min_{\Delta t} \int_0^T |h_e(t)|^2 = \left\{ \frac{2n\pi}{\omega} \mid n \in \mathbf{Z} \right\} \quad (3.3)$$

ここで、 T はジッタ周期を超えるある一定時間区間である。すなわち、姿勢ジッタの角速度に対して Δt による位相のずれが最大 (= π) のときに DEM のジッタノイズの振幅が最大となり、逆に位相のずれが無い (= 0) ときは、姿勢ジッタが存在するにもかかわらず DEM のジッタノイズは現れない (但し、水平位置誤差は発生する)。ここで時刻差 Δt が一定でその誤差が無視できると仮定すると、時間区間 T におけるピッチ角のジッタ誤差の振幅は DEM で観測される周期ノイズの振幅にほぼ比例する。 Δt は、衛星軌道におけるステレオ視の基線長に該当する時刻となり、画像マッチングにおける視差の差、すなわち、ステレオ画像の衛星高度、ピッチ角、地上ターゲットの高さにより変化するが、その変化量がジッタの周期に比較して十分小さければほぼ一定と考えてよい。ステレオ画像間のピッチ角ジッタ誤差と DEM の高さ周期ノイズの関係について、図 3-2 に示す。

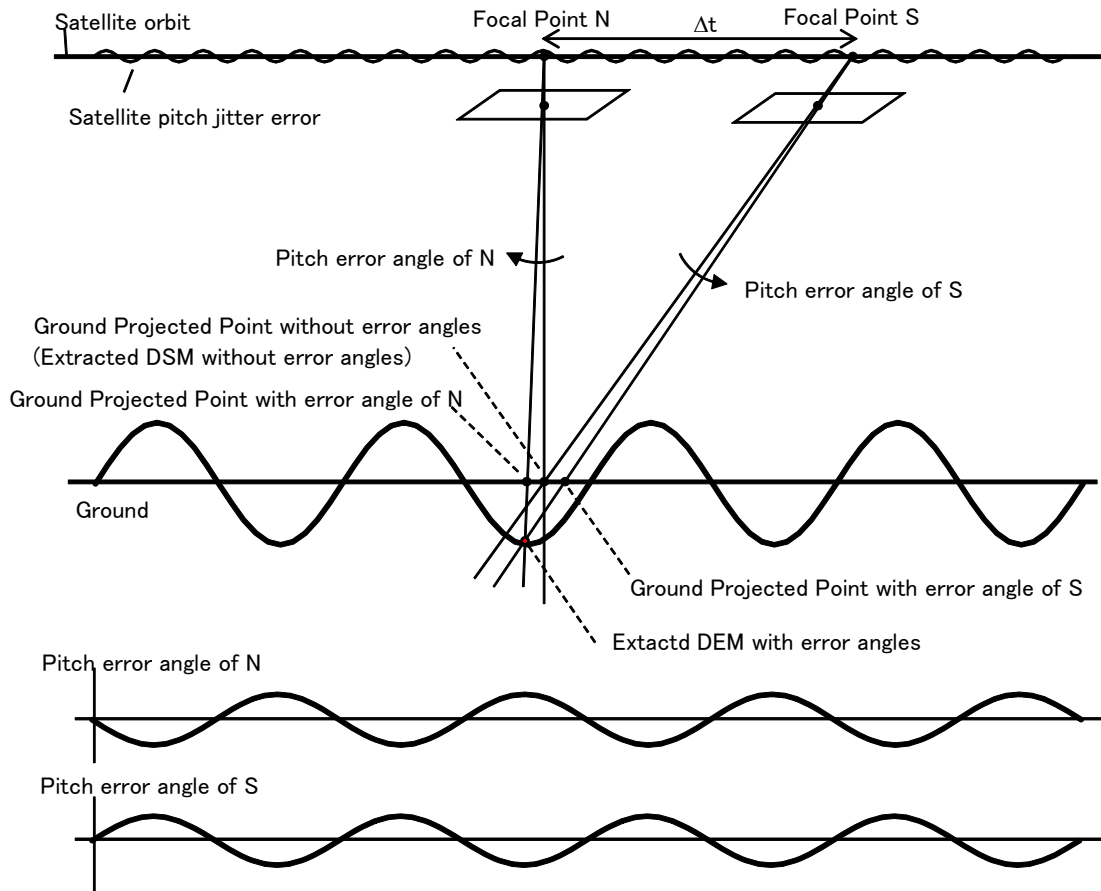


図 3-2 ステレオ画像間のピッチ角ジッタ誤差と DEM の高さ周期ノイズの関係
(ステレオペアのピッチ角ジッタ位相差= π の場合)

第2章の図 2-3, 図 2-4 に挙げた PRISM による DEM の 1 km, 100 m ジッタ発生データについては、ジッタ周期のそれぞれ約 931 m, 114 m に対して、対象としたエリアの高さの偏差（地形の起伏）は 10 m 程度であり、PRISM の直下視に対する前方・後方視の $B/H = 0.5$ による地上距離換算では 5 m 程度である。ここで、衛星高度や姿勢角バイアスの変動はほぼ無視できることから、これらのケースにおける時刻差 Δt はほぼ一定と考えてよいことになる。但し、例えば対象とする地形の高さ偏差の地上距離換算値がジッタ周期に対して比較的大きい場合は、仮にピッチ角ジッタの振幅が一定であったとしても、時刻差 Δt の変動に従い DEM のジッタ振幅が変化することになる。特に 100 m ジッタの場合はその影響が大きいことが予想される。

DEM の 1 km, 100 m ジッタで発生しているそれぞれ ~ 6 m, ~ 2 m の振幅について、 $\Delta t = (2n + 1) \pi / \omega$, $A_{PN} = A_{PS}$ を仮定した場合のジッタ角誤差の振幅を ALOS の衛星高度 $H = 691.65$ km, PRISM の $B/H = 0.5$ として推定すると、それぞれ $\sim 1.24 \times 10^{-4}$ degree, $\sim 4.14 \times 10^{-5}$ degree となる。ここで、ALOS 衛星の姿勢決定精度の仕様値は、STT + IRU による標準姿勢データの 10 Hz までの周波数帯にて $\pm 2.0 \times 10^{-4}$ degree であることから、あくまでも仕

様値に対しては十分満たした誤差といえる [Iwata, 2009]。但し、結果としては DEM の無視できないノイズに繋がっていることから、少なくとも DEM の作成に際しては仕様値として十分でなかった可能性もある。ここで、ピッチ角ジッタ誤差による DEM のノイズが最大になる場合において、その最大値 h_{max} に該当するピッチ角の誤差振幅 A_p は

$$A_p = \frac{(B/H)}{2} \tan^{-1} \frac{h_{max}}{H} \quad (3.4)$$

であり、例えば、PRISM の衛星高度 H 及び B/H を適用すると、DEM の高さの最大 1 m の誤差に該当するピッチ角誤差は、 $\pm 2.1 \times 10^{-5}$ degree 程度となる。すなわち、ALOS の標準的な姿勢計測データは、実際にセンサに発生していた姿勢ジッタ振動に対して、第2章に述べたサンプリング周波数のみならず、振幅精度においても DEM のシステムノイズを補正するためには不十分であった可能性が考えられる。

一方、姿勢のロール角ジッタ計測誤差については、画像上 CT 方向の周期的な位置誤差に寄与することで第2章に述べたマッチング画像上エピポーラ直線の歪を引き起こし、マッチングの周期的なランダム誤差の増加という形で DEM の高さ誤差に間接的な影響を与えることが知られている [Girod, 2015]。すなわち、本誤差は、周期的に真の対応点が元来存在しない探索直線上を探索することにより発生するマッチングの誤差であることから、その傾向はテンプレートマッチングであれば窓サイズや対象とする地域特徴に強く依存するため定式化は難しいが、少なくともマッチングのエピポーラ画像上で1画素を超える位置誤差になる場合は明らかな精度低下を引き起こすことが予想される。ここで、ロール角ジッタ誤差によるエピポーラ直線直交方向のマッチング画像投影誤差が最大になる場合において、その最大値 l_{max} に該当するロール角の誤差振幅 A_R は

$$A_R = \tan^{-1} \frac{l_{max}}{2H} \quad (3.5)$$

であり、例えば、PRISM の衛星高度及び B/H の場合、1画素 (2.5 m) の誤差に該当するロール角誤差は、 $\pm 1.0 \times 10^{-4}$ degree 程度となる。なお、第2章の確認により PRISM の DEM については、ロール角ジッタ計測誤差に係る周期的な高さのランダムノイズは確認されなかったため本研究では対象外とする。

3.1.2 ALOS 衛星の姿勢データ

ALOS 衛星で標準姿勢データ (Precision Attitude Determination: PAD) として利用されている計測値は、STT + IRU による 10 Hz サンプリングのデータでありそのナイキスト周波数は 5 Hz である。第2章の解析で使用した DEM や過去の報告 [Bignone *et al.*, 2008; Fukami *et al.*, 2011] による DEM もこの標準姿勢データによるものである。一方、ALOS 衛星では、あくまでも標準処理適用外ではあるが、675 Hz までの周波数帯をカバーする加速度センサ (Angular Displacement Sensor: ADS) を試験機器として搭載しており、これ

を適用した高周波姿勢データ (High-frequency Attitude Determination: HAD) を利用することが可能である [Iwata *et al.*, 2009]。この HAD の適用により、少なくとも PAD のサンプリング周波数不足によるノイズは解消が期待されると共に、これら帯域幅が不足する姿勢を用いた場合の DEM への影響について確認することができる。そこで、まず HAD と PAD のデータ自身の比較を行った。なお、ALOS 衛星にて提供される姿勢データは、近年多くのリモートセンシング衛星で採用されているクォータニオンであり [JAXA, 2006]、センサ或いは光軸の 3 軸角度ではないため、以下によりほぼセンサ光軸の 3 軸姿勢に該当する衛星のロール角、ピッチ角に変換を行った [USGS, 2006]。まず、衛星の軌道方向を x 、軌道面の法線方向を y 、地心方向を z とする衛星の基準座標系と、天球座標系 (J2000) との関係を姿勢データとして記述しているクォータニオンについて、 3×3 の回転行列 \mathbf{Q} に変換する。

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_4q_3) & 2(q_1q_3 + q_4q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_4q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_4q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_4q_2) & 2(q_2q_3 + q_4q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

ここで、 q_1, q_2, q_3 はクォータニオンのベクトル成分、 q_4 はスカラー成分である。ここで、衛星の基準座標における 3 軸姿勢のオイラー角に該当する 3×3 行列 \mathbf{E} は以下により得られる。

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} e_{00} & e_{01} & e_{02} \\ e_{10} & e_{11} & e_{12} \\ e_{20} & e_{21} & e_{22} \end{pmatrix} = \mathbf{M}^T \mathbf{Q} \quad (3.7)$$

ここで、 \mathbf{M} は、衛星姿勢の理想状態 (姿勢誤差 = 0) を仮定した衛星基準座標系と、J2000 との関係を表す 3×3 行列であり、以下で与えることができる。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^t & \mathbf{y}^t & \mathbf{z}^t \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

ここでベクトル $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ は \mathbf{M} による座標変換における各軸の直交基底であり以下で与えられる。

$$\mathbf{z} = -\frac{\mathbf{P}}{|\mathbf{P}|}, \quad \mathbf{y} = \frac{-\mathbf{P} \times \mathbf{V}}{|-\mathbf{P} \times \mathbf{V}|}, \quad \mathbf{x} = \mathbf{y} \times \mathbf{z} \quad (3.9)$$

ここで、 \mathbf{P} 及び \mathbf{V} は、衛星の天球座標系における軌道位置および軌道方向の各ベクトルである。衛星座標のロール角 ϕ 、ピッチ角 θ は \mathbf{E} の行列要素から以下により得られる。

$$\phi = -\sin^{-1} e_{12} \quad (3.10)$$

$$\theta = \tan^{-1}(e_{02} / e_{22}) \quad (3.11)$$

1 km ジッタの発生が確認された PRISM 画像に該当する PAD, HAD 各姿勢データのピッチ角の 1 秒間におけるプロファイルについて図 3-3 に示す。また, FFT 振幅スペクトル (PAD: ~5 Hz (Nyquist), HAD: ~10 Hz) について図 3-4 に示す。

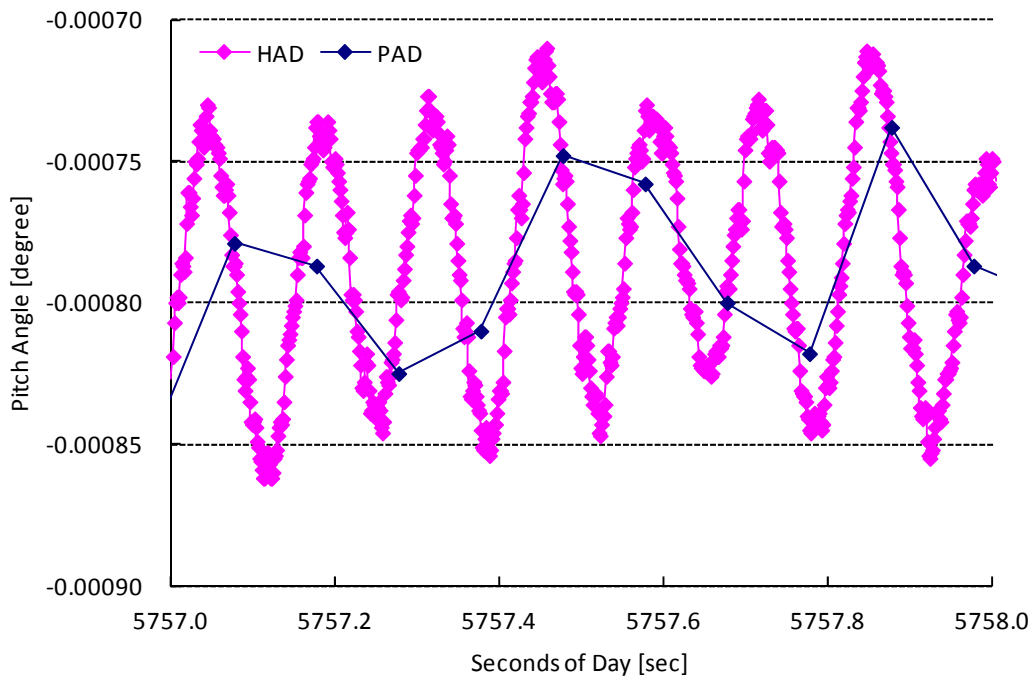


図 3-3 1 km ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値プロファイル

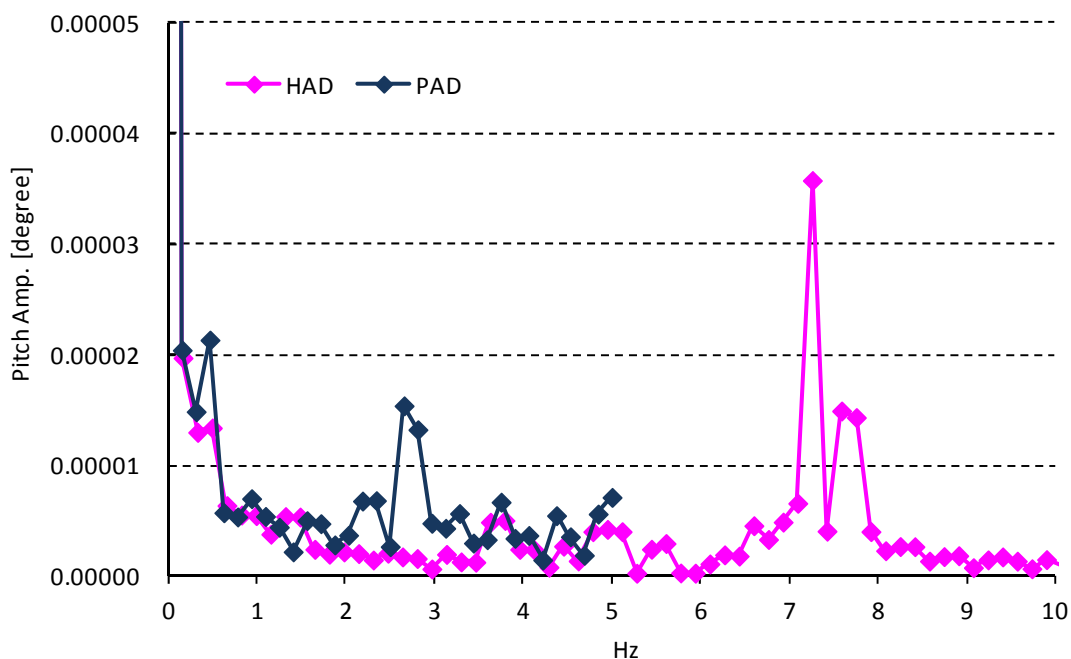


図 3-4 1 km ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値 FFT 振幅スペクトル

図 3-3 によると, 675 Hz サンプリグ(周期 = 1.48 msec)の HAD では 0.7×10^{-4} degree 程度の振幅を持つジッタが計測されているが, 10 Hz サンプリグ (周期 = 0.1 sec) PAD ではサンプリグ周波数の不足により十分に計測できていないことが確認できる。ここで, 1 m の誤差に該当するピッチ角誤差は, $\pm 2.1 \times 10^{-5}$ degree 程度であることから, HAD で計測されている姿勢ジッタは DEM のノイズに大きく寄与すると考えられる。これらの周波数帯については, 図 3-4 における HAD の FFT スペクトルによると 7~8 Hz に分布しており第 2 章に述べた DRC 駆動によるものと考えられる。これら周波数帯のジッタについては, ナイキスト周波数 = 5 Hz の PAD では計測できずにほぼ 2.5~3 Hz の周波数帯におけるエイリアシングとして残留していることが判る。

ここで, 図 3-3 のプロファイルについて, エイリアシングを起こしている PAD 計測値と HAD 計測値との差を確認すると最大で 1.0×10^{-4} degree 程度であり, DEM の 1 km ジッタの振幅から見積もった約 1.24×10^{-4} degree にほぼ一致する。すなわち, PAD で作成した DEM に生じた 1km ジッタは, PAD のサンプリグ不足に伴うものと予想され, HAD を適用することで解消する可能性が高い。

次に 100 m ジッタの発生が確認された PRISM 画像に該当する HAD 姿勢データのピッチ角の 0.1 秒間におけるプロファイルについて図 3-5 に示す。また, FFT 振幅スペクトル (50~100 Hz) について図 3-6 に示す。

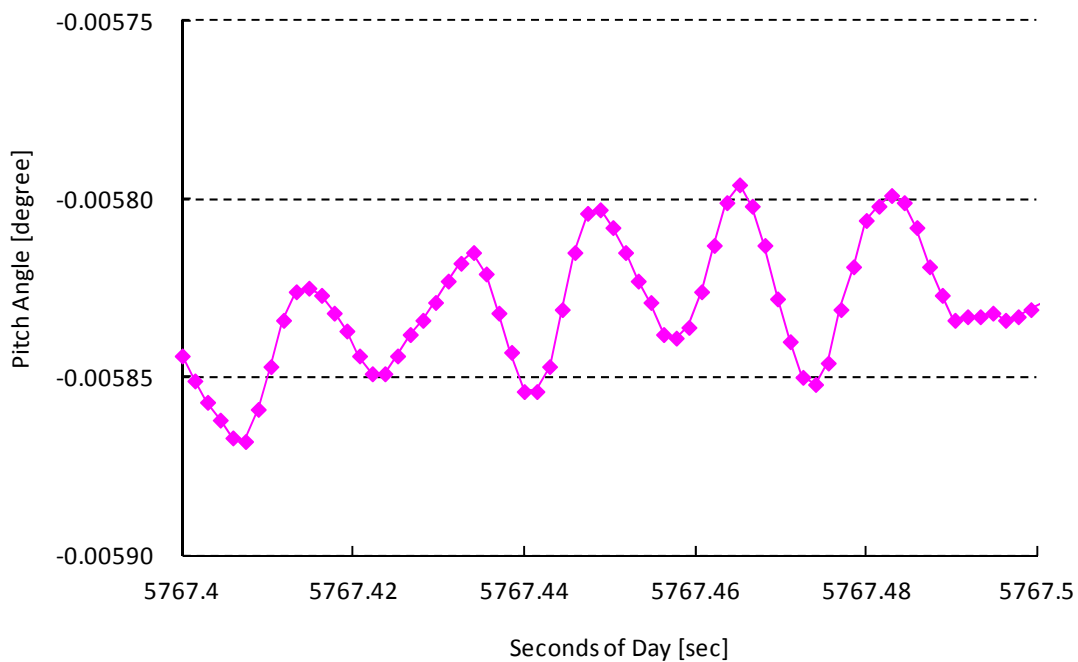


図 3-5 100 m ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値プロファイル

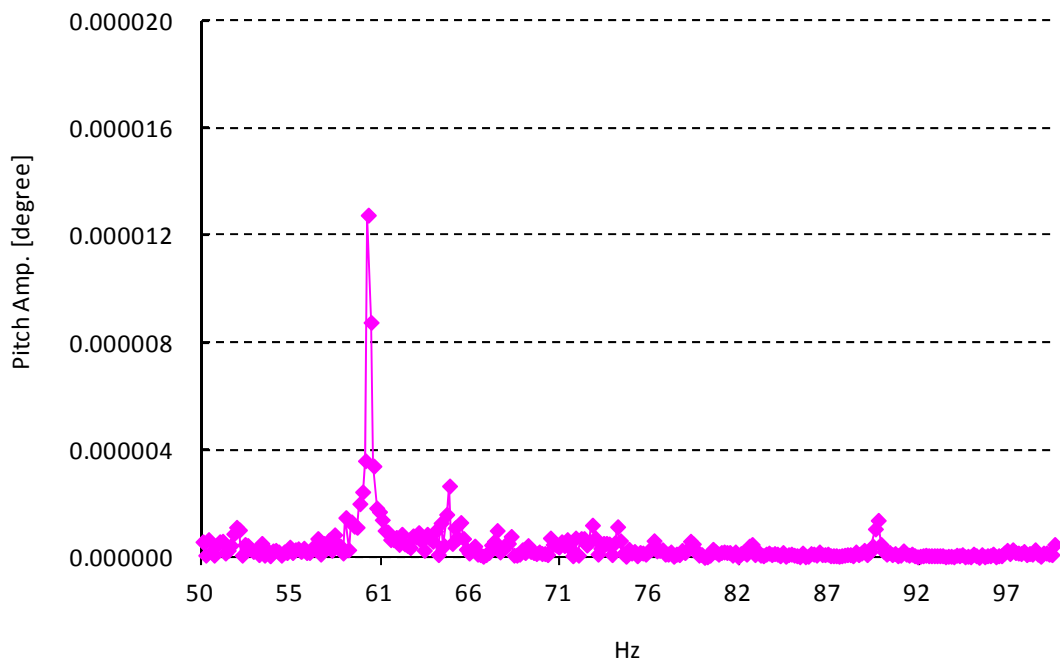


図 3-6 100 m ジッタ発生データの姿勢ピッチ角計測値 FFT 振幅スペクトル

図 3-5 によれば、 3.0×10^{-5} degree 程度の振幅を持つジッタが計測されており DEM の 100 m ジッタの振幅から見積もった約 4.14×10^{-5} degree に対してやや小さな値ではあるが、HAD で検知されていることが判った。なお、図 3-6 によれば、その周波数帯はおおよそ 60 Hz 付近であり、こちらも DEM の 100 m ジッタの振幅から見積もった 60.5 Hz にほぼ該当する。すなわち DEM の 100 m ジッタについても 1 km ジッタ同様に HAD を適用することで解消する可能性があると考えられる。

3.2 低周波ジッタノイズの低減

前節の通り，1 km ジッタについて，標準姿勢データである PAD に代えて高周波姿勢データである HAD を適用することでノイズを低減できる可能性が高い。以降では，高周波姿勢データによる DEM の周期ノイズ低減効果の確認結果，および ADS センサによる姿勢ジッタ計測値の応答特性の解析について述べる。

3.2.1 高周波姿勢データの適用

前節に挙げた 1 km ジッタが発生している PRISM 画像について，幾何モデル情報の姿勢データに PAD に代えて HAD の適用を行った上で DEM 処理を行った。HAD 姿勢にて作成した DEM について PAD 姿勢にて作成した DEM との高さ-グレースケール画像の比較を図 3-7 に示す。また，図 2-8，図 2-10 に該当する DEM の高さプロファイル及び FFT 振幅スペクトルについて，それぞれ図 3-8，図 3-9 に示す。

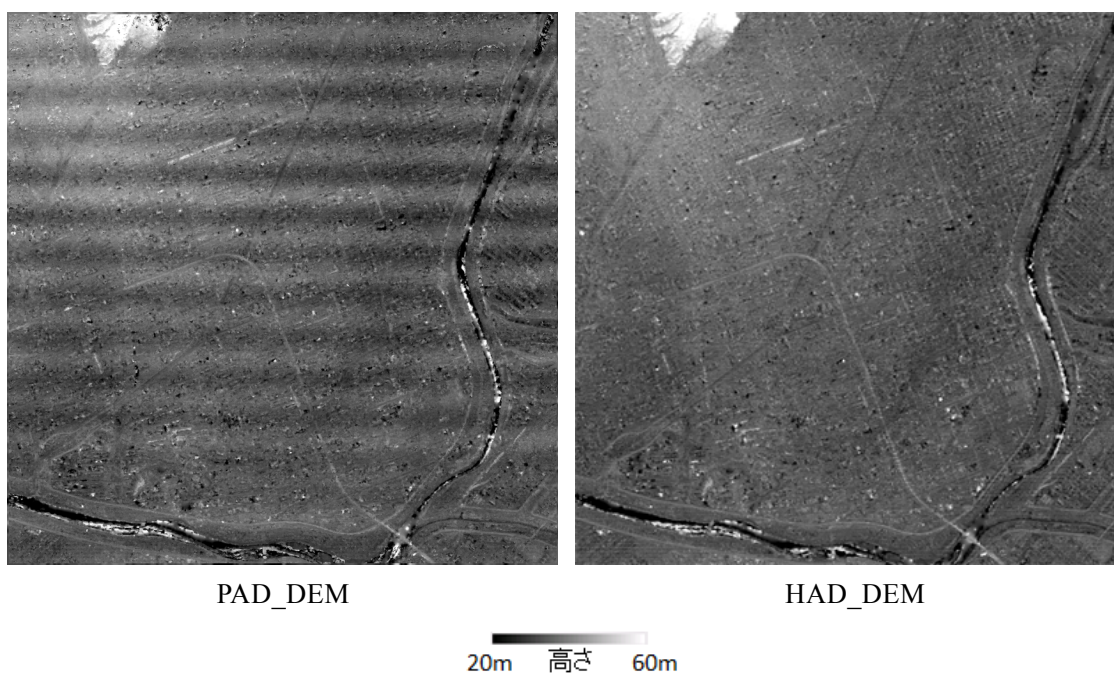


図 3-7 1 km ジッタ DEM サンプル (12 km x 12 km)
(2009/9/23 北海道札幌付近観測の PRISM 二方向視ステレオシーンから作成)

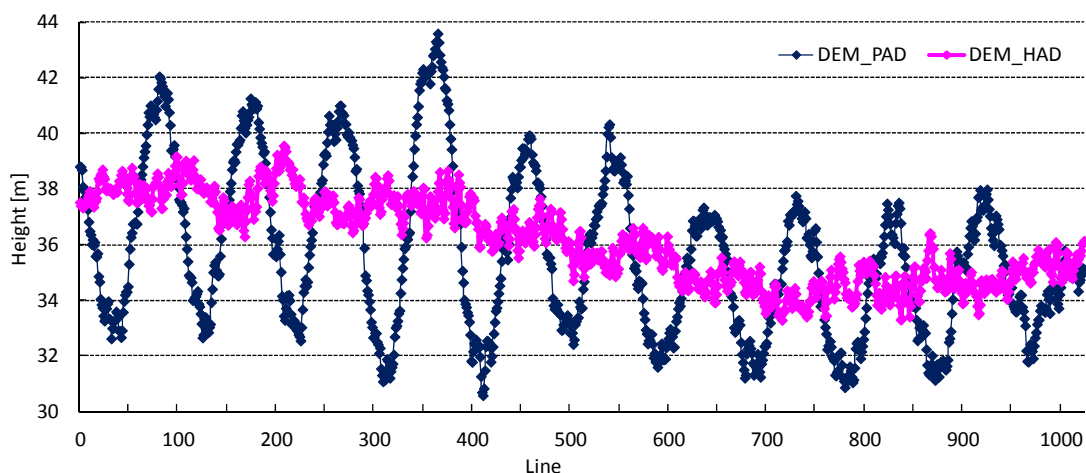


図 3-8 1 km ジッタ DEM サンプルの高さプロファイル

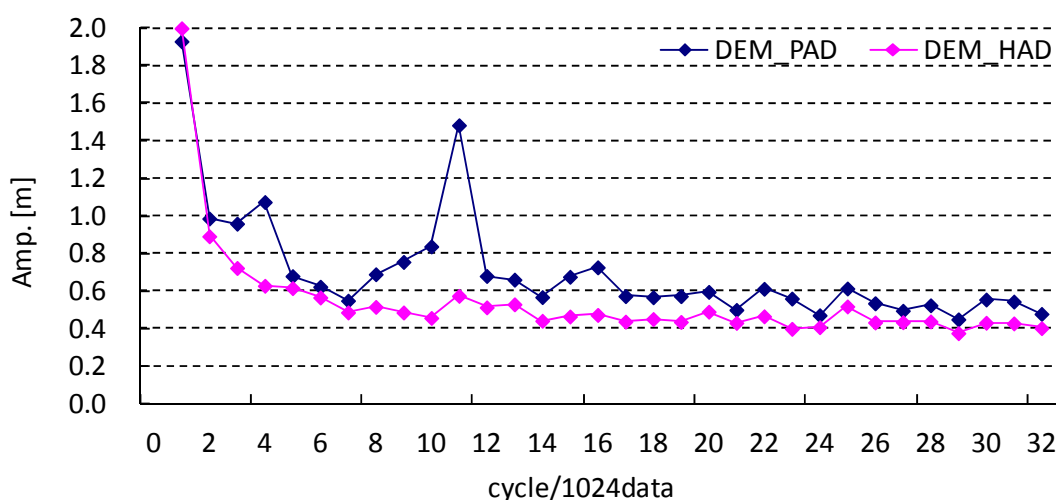


図 3-9 1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均

図 3-7 によれば、PAD 姿勢による DEM に発生していたジッタはほぼ解消していることが確認できる。また図 3-8 のプロファイルによれば、PAD による DEM に発生していた最大 6m 程度の振幅を持つジッタは、オリジナル地形の揺らぎに伴うと思われる ± 1 m 程度の偏差を除き解消できていることが確認できた。また、図 3-9 による FFT 振幅スペクトルも上記傾向に沿ったデータになっている。

ところが、HAD 姿勢をその他のサンプルに適用した結果、75 シーン 中 12 シーン (16%) 程度の割合で十分にジッタが補正できないケースがあることが確認された。そのサンプルの一つとして、2007/5/3 に埼玉県北部を観測した PRISM 画像の PAD 姿勢、HAD 姿勢によるそれぞれ作成 DEM の高さ—グレースケール画像の比較を図 3-10 に示す。なお、

本サンプルではジッタの有無をより明確に表現するために、各 DEM について PRISM の全球処理データ (AW3D) との差画像を作成した結果を図 3-11 に示す。ここで全球処理データは、4~5 シーンの異なる観測日による DEM データをスタックして作成されているため、仮に個々のシーンにシステムノイズが発生している場合にも、スタックによりそれらが十分にキャンセルされていると考えることができる [Takaku *et al.*, 2016]。

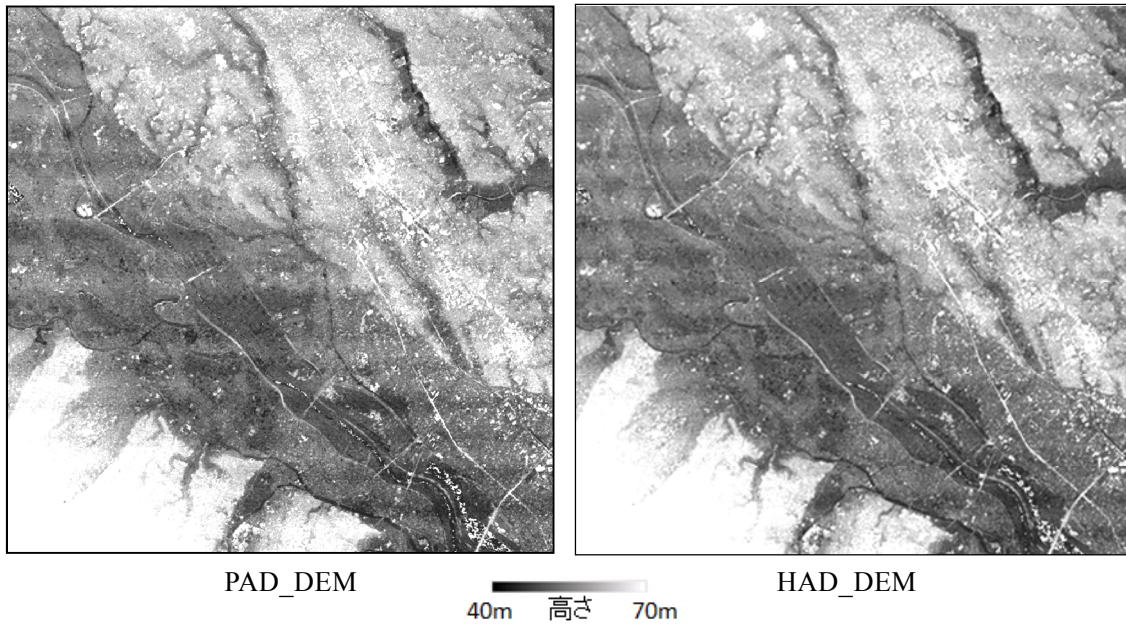


図 3-10 DEM の 1 km ジッタサンプル (16 km x 16 km)

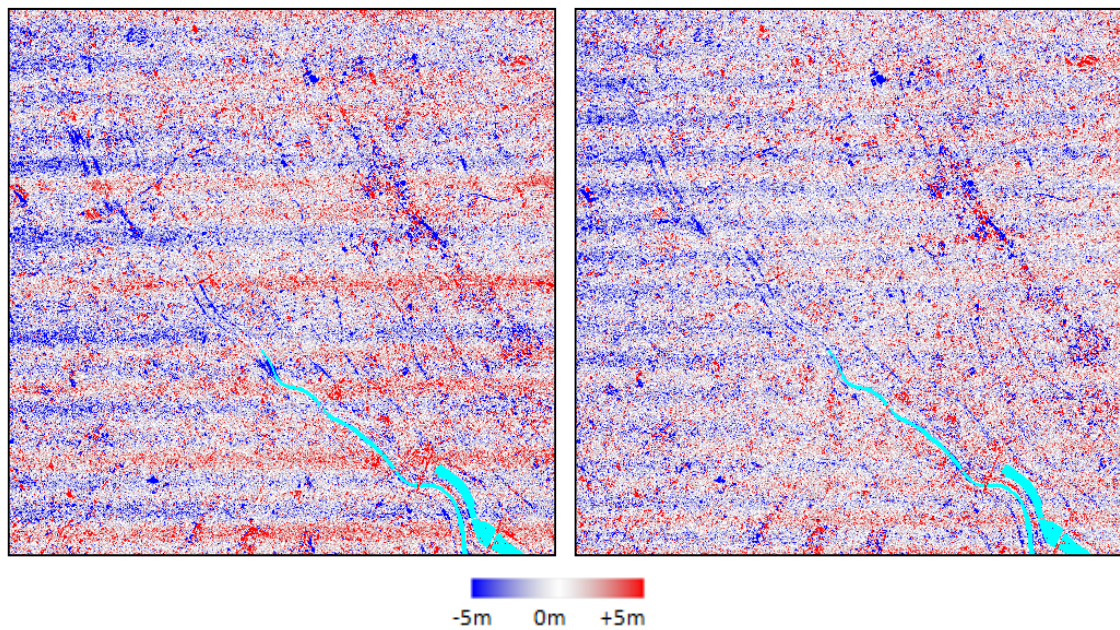


図 3-11 DEM の 1 km ジッタサンプルの AW3D との差画像 (16 km x 16 km)

また、両 DEM のそれぞれ FFT 振幅スペクトル平均の比較について図 3-12 に示す。なお、ここでの FFT サンプルライン数 $N=2048$ 、平均化カラム数 $M=1000$ とした。

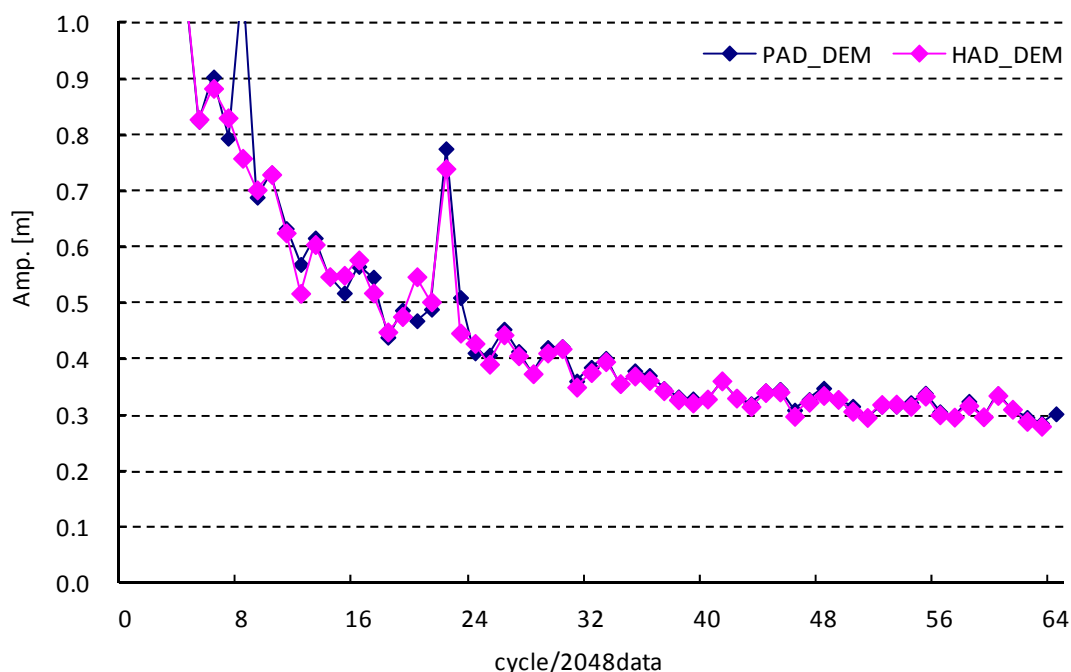


図 3-12 1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均

図 3-11 によると、HAD 姿勢適用後の DEM においては、PAD 姿勢適用時に見られたエイリアシングによる不規則なノイズ成分は取り除かれているが、依然としておおよそ 2~3 m 程度の振幅を持つ 1 km ジッタの残留が確認できる。また、その周期は、図 3-12 の FFT 振幅スペクトルにおいて該当するピーク位置の 22 cycle / 2048 data から換算すると約 930 m となる。HAD の適用によっても DEM に 1 km ジッタノイズが残る原因としては、HAD 姿勢データの生成に使用された ADS センサ自身の周波数応答特性、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 1 km ジッタに該当する 7~8 Hz の帯域にて計測値の誤差が発生していることが予想される。よって、これら応答特性の誤差について DEM に発生しているジッタノイズから逆に推定する手法を試みた。以下にその詳細を述べる。

3.2.2 衛星姿勢データ応答特性の解析と修正

まず、応答特性の誤差が疑われる HAD 姿勢の詳細確認を行うためにピッチ角の FFT 振幅スペクトルの計測を行った。結果について図 3-13 に示す。

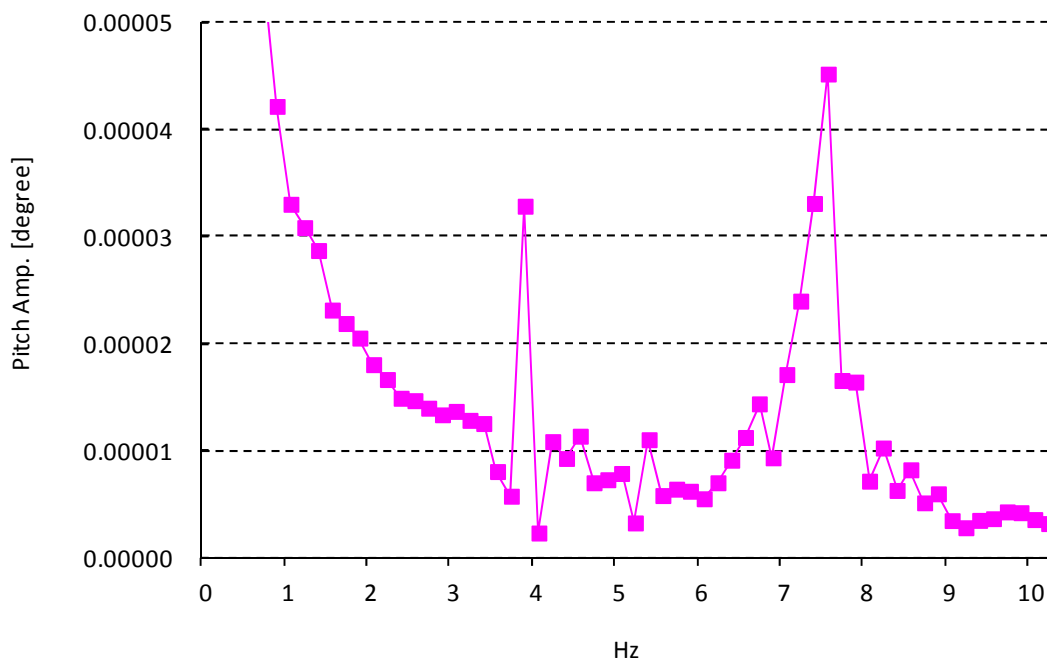


図 3-13 1 km ジッタ残留データの HAD 姿勢ピッチ角計測値 FFT 振幅スペクトル

図 3-13 によれば、HAD 姿勢ピッチ角の FFT 振幅スペクトルとしては、6.3~8.0 Hz 付近にピークを持つジッタが計測されており、衛星対地速度を 6.9 km/sec として概算すると、AT 方向で約 863~1097 m 程度の周期に該当することから、DEM の周期ノイズとほぼ一致する。すなわち、DEM の 1 km ジッタに該当する HAD 姿勢のピッチジッタ成分は、その周期から見て HAD 姿勢にすでに含まれていることが考えられる。但し、HAD 姿勢を使用しても DEM の周期ノイズが補正されていない原因としては、HAD 姿勢の該当周波数帯における振幅あるいは位相に誤差があることが考えられる。そこで、HAD で作成された DEM (以下 HAD_DEM) に対して、ピッチ角ジッタ成分がどのように寄与していたかを確認するために、ジッタ成分をカットした HAD (以下 HAD₀) を使用して DEM (以下 HAD₀_DEM) 作成を行った。すなわち、図 3-13 に示した HAD 姿勢ピッチ角計測値の FFT スペクトルについて

$$F(\omega) = \begin{cases} 0 & (\omega = 6.3 \sim 8.0\text{Hz}) \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (3.12)$$

によりフィルタし、逆 FFT を行ってクォータニオンに変換した HAD を使用して DEM 作成を行った。作成した HAD₀_DEM のグレースケール表示画像、および AW3D との差画像について図 3-14 に示す。また、図 3-12 と同様の振幅スペクトル平均について、HAD_DEM, HAD₀_DEM の場合の比較を図 3-15 に示す。

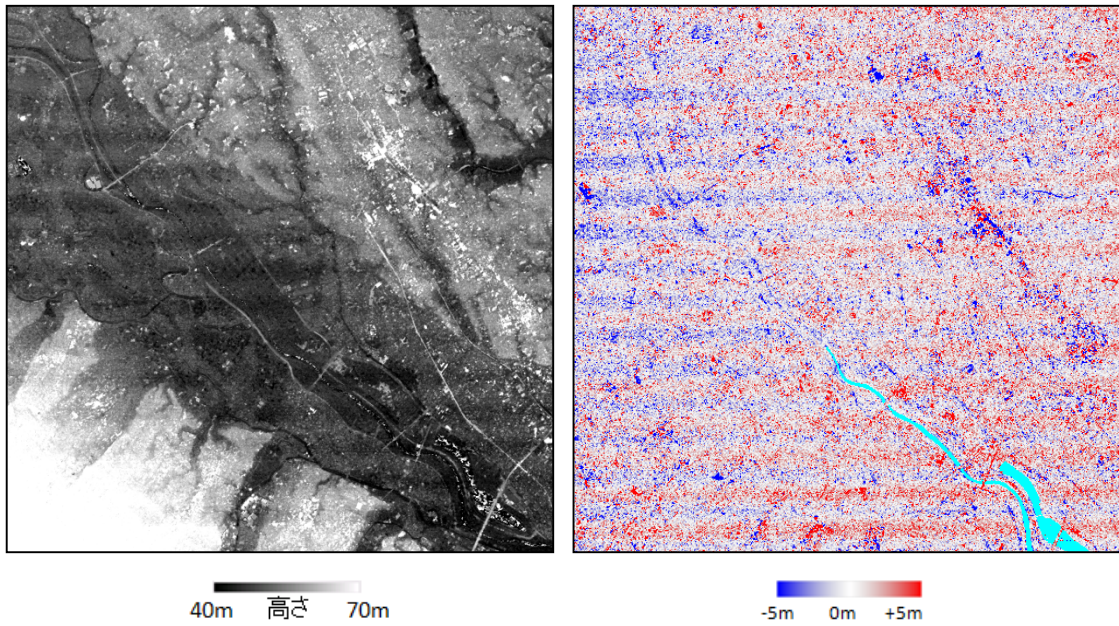


図 3-14 HAD₀による作成 DEM
(左: 高さのグレースケール表示, 右: AW3D からの差画像)

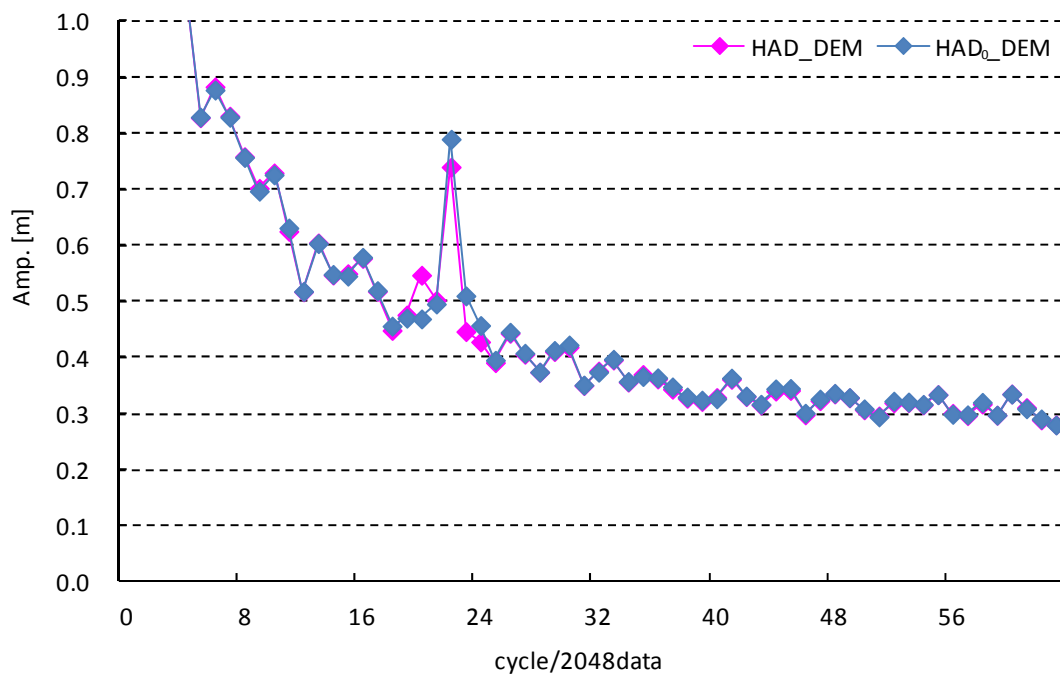


図 3-15 1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均の比較

図 3-15 の HAD_DEM と HAD₀_DEM のそれぞれ AT 方向振幅スペクトルを比較すると、共に 22 cycle にほぼ同程度の振幅のピーク (HAD_DEM で 0.74 m, HAD₀_DEM で 0.79 m) があることから HAD のピッチジッタ計測値による補正がほとんど効いていないように見える。ここで各 DEM の AT 方向の FFT 位相スペクトルについて、振幅スペクトルと同様に CT 方向 M サンプルの平均値 $\varphi(\omega)_{ave}$ を以下により算出した。

$$\varphi(\omega)_{ave} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \tan^{-1}(im(\omega)_m / re(\omega)_m) \quad (3.13)$$

ここで、 ω は DEM 周期の角速度(cycle / 2048 sample), $re(\omega)$, $im(\omega)$ はそれぞれフーリエスペクトルの実数部, 虚数部である。 M は、振幅スペクトル同様に 1000 とした。すると、HAD_DEM と HAD₀_DEM の $\omega = 22\text{cycle}$ における各 $\varphi(\omega)_{ave}$ は、21.8 degree 及び -86.2 degree となっていることが確認された。すなわち、両 DEM 周期ノイズ成分は、振幅はほぼ同じ程度であるが、位相が 108 degree 程度ずれていることが確認できる。表 3-1 に HAD_DEM と HAD₀_DEM の 22 cycle におけるそれぞれフーリエスペクトル H, H_0 の振幅 A 及び位相 φ を整理する。

表 3-1 各周期誤差の振幅及び位相

Data	H	H_0
A [m]	0.74	0.79
φ [degree]	21.8	-86.2

比較のために H, H_0 の振幅 A 及び位相 φ についてそれぞれ

$$f(\delta) = A \cdot \cos(\delta + \varphi) \quad (3.14)$$

による一周期分($\delta = 0 \sim 360$ degree)を示したプロファイルを図 3-16 に示す。

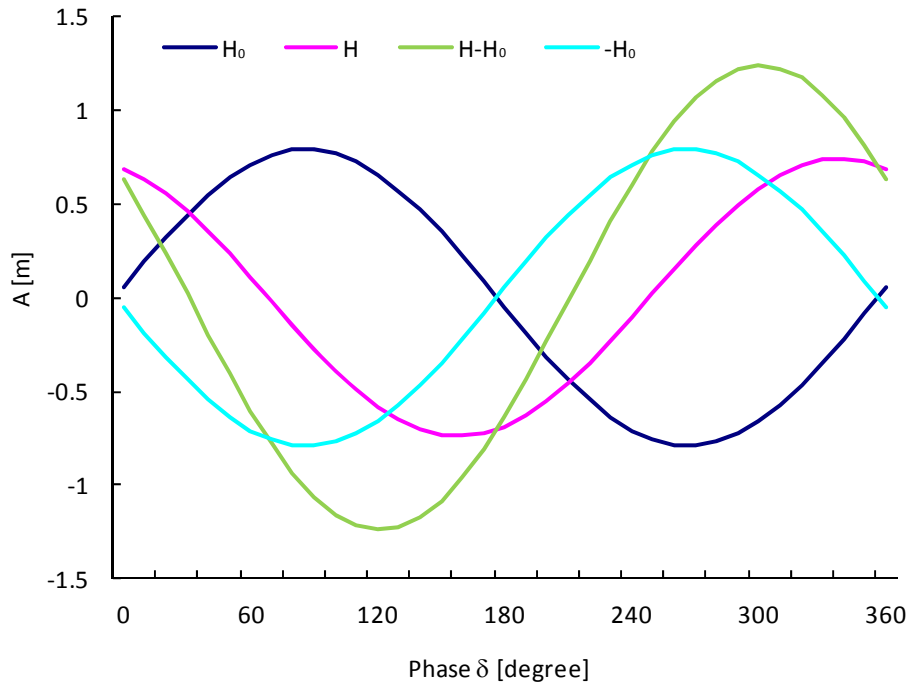


図 3-16 1 km ジッタ DEM の振幅及び位相比較 (凡例中 DEM を省略)

HAD₀ DEM の 1km ジッタは、ピッチ角のジッタ成分を 0 として作成した DEM によるものであるから、これを補正するための真のピッチ角ジッタ成分による DEM の周期ノイズ補正量は図 3-16 における H₀ の周期ノイズ成分の逆位相 (-H₀) となるはずである。これに対し、実際に計測された HAD のピッチ角ジッタによる補正量は図 3-16 における H - H₀ となっていると考えることができる。よって、計測された HAD のピッチ角ジッタの該当周波数帯の応答特性 G としては、近似的に

$$G = \frac{H - H_0}{-H_0} \quad (3.15)$$

と考えることができる。なおここで、

$$H_d = H - H_0 \quad (3.16)$$

としたときのその振幅および位相は以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned}
 A_{df} &= \sqrt{a^2 + b^2}, \varphi_{df} = \tan^{-1} \frac{b}{a} \\
 a &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \{A_{HAD} \cos(\delta + \varphi_{HAD}) - A_{HAD0} \cos(\delta + \varphi_{HAD0})\} \cdot \cos \delta \cdot d\delta \\
 b &= -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \{A_{HAD} \cos(\delta + \varphi_{HAD}) - A_{HAD0} \cos(\delta + \varphi_{HAD0})\} \cdot \sin \delta \cdot d\delta
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

ここで A_d , φ_d は, H_d の振幅および位相成分, A , A_0 は, H , H_0 のそれぞれ振幅成分であり, φ , φ_0 はそれぞれ位相成分である。HAD_DEM, HAD₀_DEM の 1 km ジッタに該当する FFT 振幅スペクトルピークから推定したそれぞれ振幅及び位相に対して, それらを基に算出した H_d , $-H_0$, G の振幅及び位相を表 3-2 に示す。

表 3-2 PRISM/DEM と LiDAR/DEM の高さの差の統計値 (単位:m)

Data	H_d	$-H_0$	G
A [m]	1.24	0.79	1.57
φ [degree]	59.2	93.8	-34.6

得られた応答特性 G について, HAD のピッチ角の該当周波数帯に適用し, DEM 作成を行う。すなわち,

$$G^{-1} = \begin{cases} \frac{1}{A_G} e^{-j\varphi_G} & (\omega = 6.3 \sim 8.0\text{Hz}) \\ 1 & else \end{cases} \tag{3.18}$$

として HAD のピッチ角における FFT スペクトルをフィルタし, 逆 FFT を行ってクォータニオンに変換した HAD (以下 HAD_G) を用いて DEM 作成を行った。ここで A_G , φ_G はそれぞれ G^{-1} の振幅, 位相である。以上, DEM のジッタノイズから推定した姿勢ジッタ応答誤差の補正および DEM ジッタノイズの補正の流れについて図 3-17 に示す。作成した HAD_G_DEM のグレースケール表示画像, および AW3D との差画像について図 3-18 に示す。また, 図 3-15 と同様の振幅スペクトル平均について, HAD_DEM, HAD₀_DEM, HAD_G_DEM の比較を図 3-19 に示す。

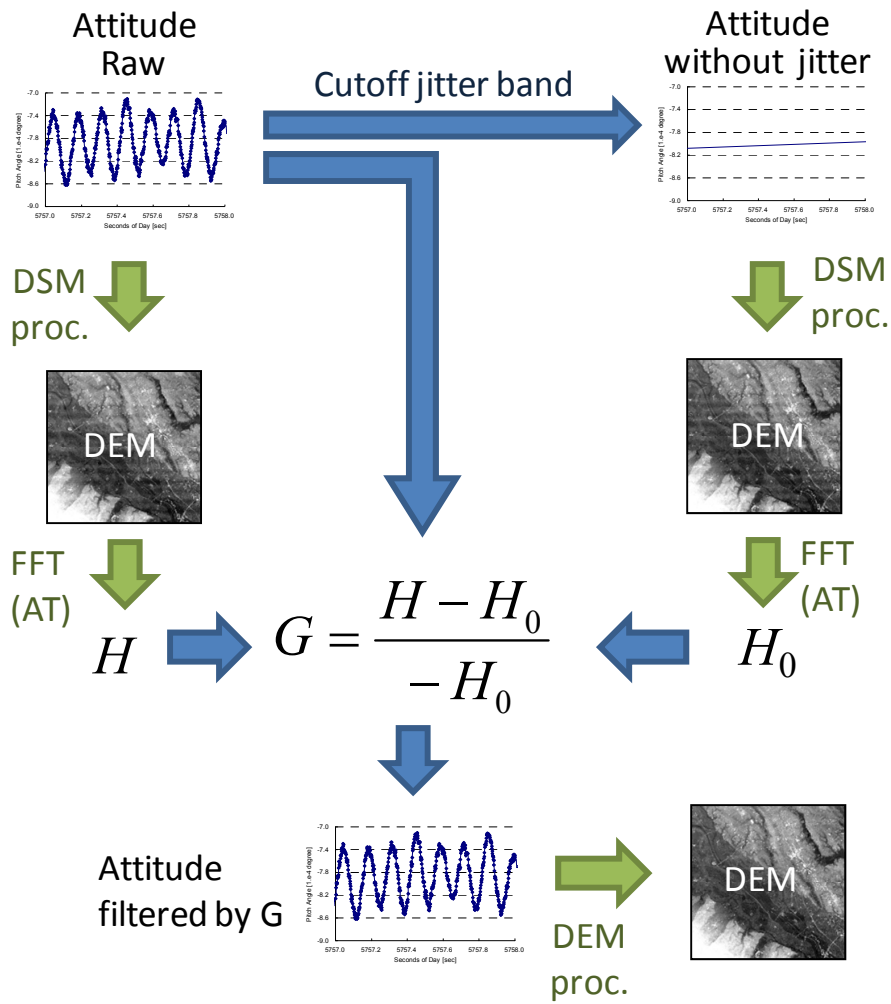


図 3-17 DEM のジッタノイズから推定した姿勢ジッタ応答誤差の補正および DEM ジッタノイズの補正

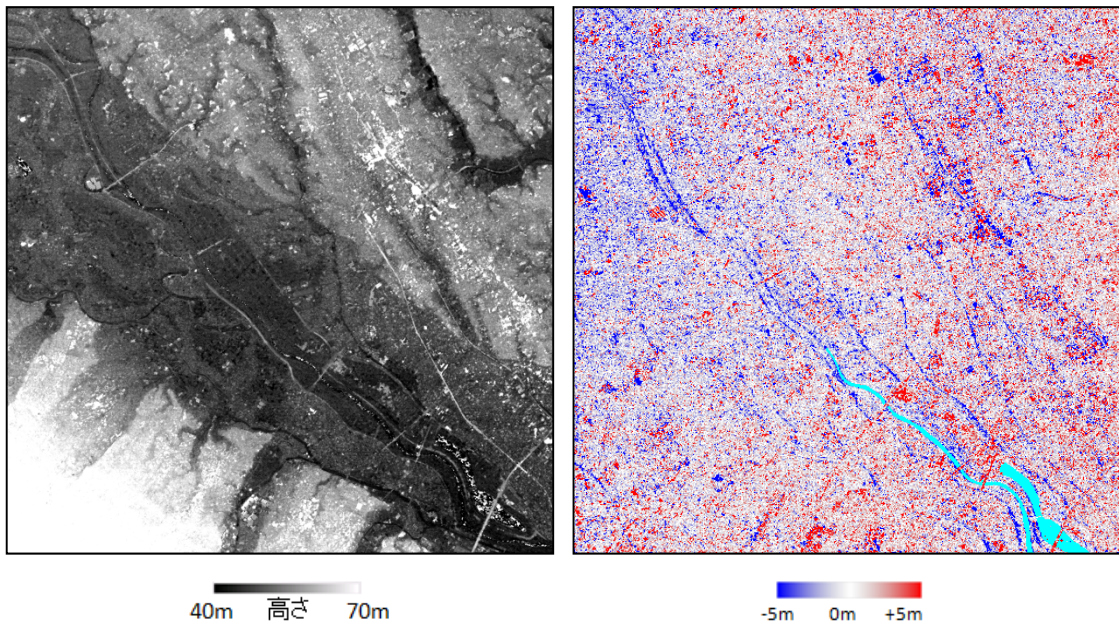


図 3-18 HAD_Gによる作成 DEM
(左: 高さのグレースケール表示, 右: AW3D からの差画像)

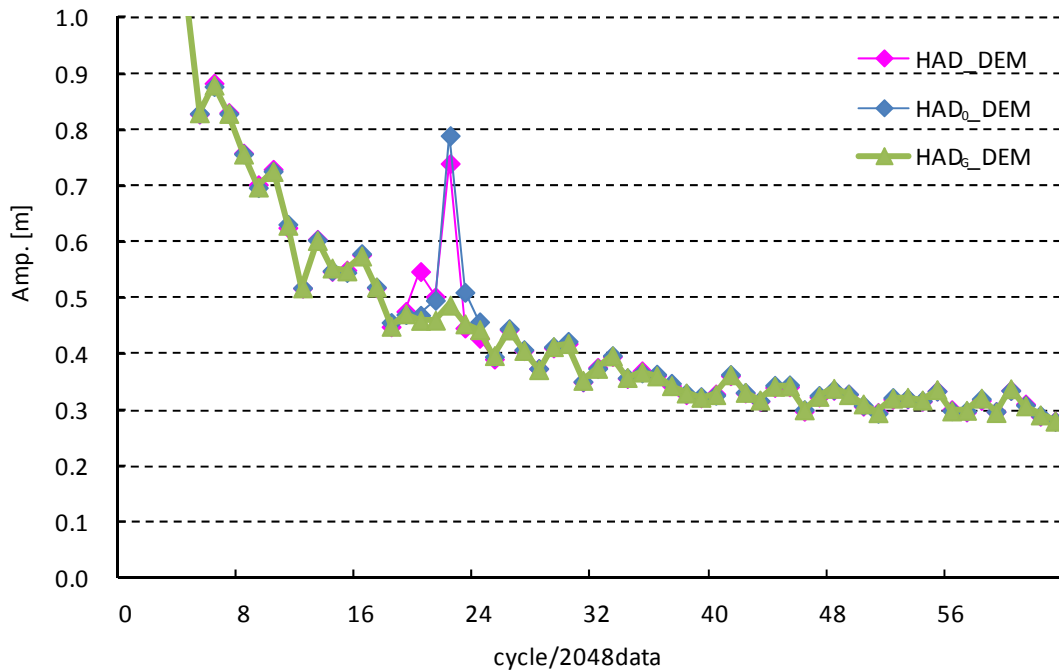


図 3-19 1 km ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均の比較

図 3-18 によれば，図 3-11 で発生していた 2~3 m の振幅を持つ 1 km ジッタがほぼ除去されていることが判る。また図 3-19 における FFT 振幅スペクトル平均の比較について，HAD_Gによる作成 DEM では，22 cycle での振幅のピークが除去されており，オリジナルの HAD 姿勢データによる HAD_DEM でみられた周期ノイズはほぼ完全に除去できていることが確認できた。

3.3 高周波ジッタノイズの低減

次に、100 m ジッタについて、1 km ジッタ同様の高周波姿勢データ HAD の適用とその問題点、および対応手法について検討した。以下ではその詳細について述べる。

3.3.1 高周波ジッタノイズの特徴

3.1 項に述べたとおり、HAD には、DEM の 100 m ジッタに該当する振幅および周波数帯のジッタが計測されている。よってまずその適用の効果を確認した。第 2 章に示した 100 m ジッタが発生しているサンプル DEM のグレースケール表示について、HAD を適用して再作成した DEM の画像を図 3-20 に示す。なお、図 3-20 では、PAD を用いて作成した DEM について示した図 2-4 のエリアを含むシーン内 3 エリア (各 5 km x 5 km) を個別に表示している。また、AT 方向の FFT 振幅スペクトル平均について、PAD による DEM の場合との比較を図 3-21 に示す。

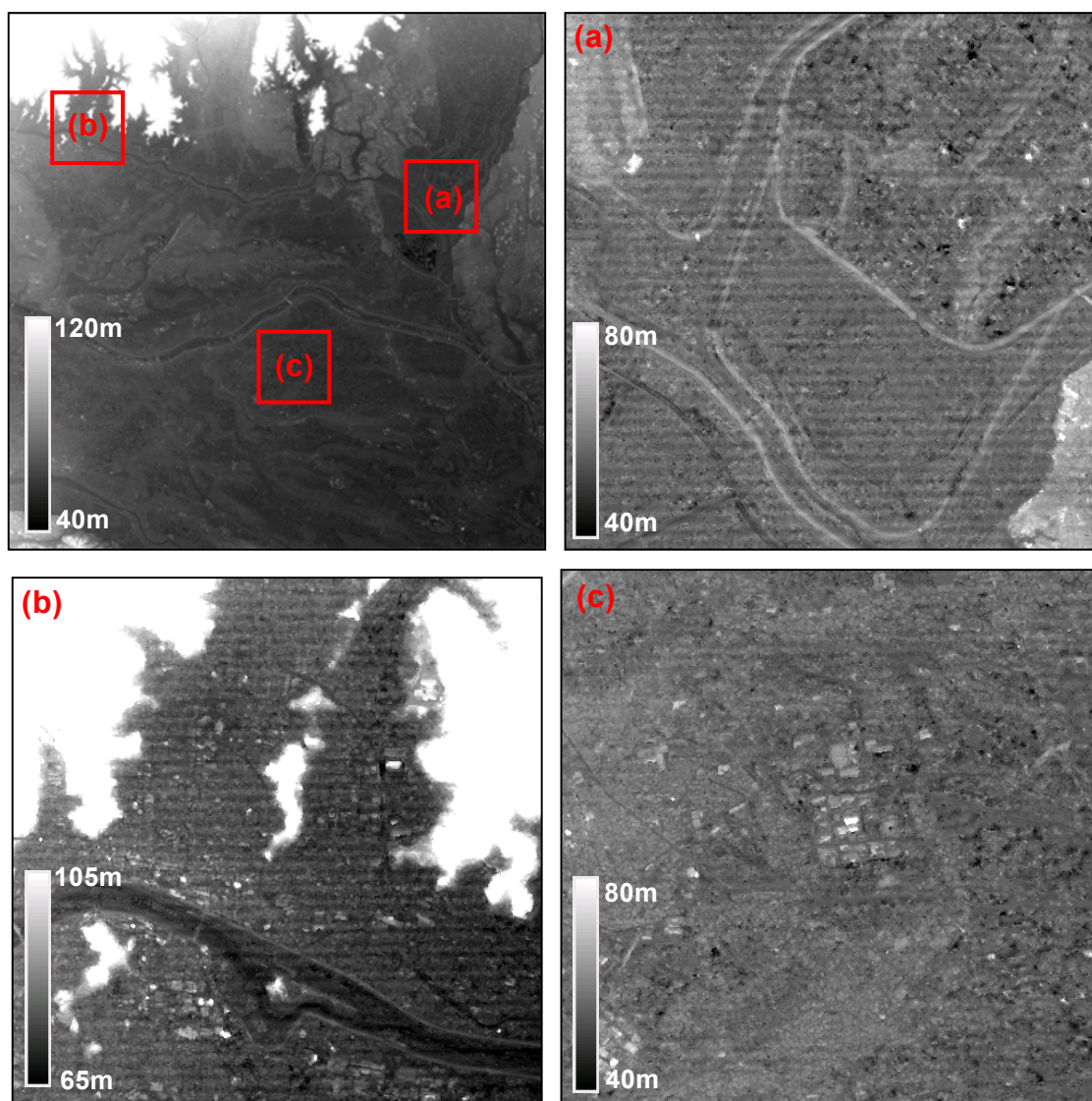


図 3-20 HAD による作成 DEM グレースケール画像
上段左: シーン全域 (35 km x 35 km), (a)~(c): 部分拡大(各 5 km x 5 km)

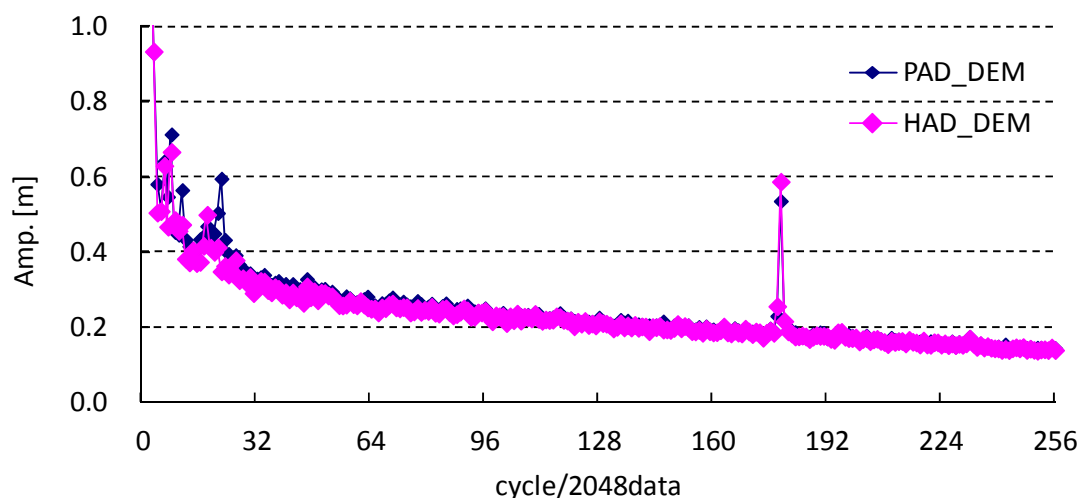


図 3-21 100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均

図 3-20 の各画像によると、DEM の 100 m ジッタは HAD を適用してもほぼ解消されず残留していることが確認できる。更に、図 3-21 の FFT 振幅スペクトルによれば、HAD 適用によりその振幅が僅かに拡大している様子が伺える。すなわち、HAD 姿勢計測値について、100 m ジッタに該当する 60 Hz 付近の応答についても、1 km の場合の 7~8 Hz 付近と同様の誤差があり、センサ光軸の振動を正確に捉えていないことが予想される。また、図 3-20 に示したように、DEM のシーン全体を詳細に目視確認すると、100 m ジッタはシーンすべてに均等の振幅で発生しているのではなく、エリアによって振幅が異なることが確認されている。図 3-20 の各部分拡大エリアにおいては(a)が比較的振幅の大きいエリア、(b)が中程度のエリア、(c)が小さいエリアとなっている。一方、図 3-21 の FFT 振幅スペクトルは計測エリア全体の平均的なエネルギーを表現していることになる。

DEM の 100 m ジッタの振幅がシーンのエリアによって異なる原因は、3.1 項に述べた DEM のジッタと姿勢ピッチ角誤差との関係において、姿勢ジッタ誤差自身の特性 (A_{PN} , A_{PS} , ω , φ_0) が変化し易いことが挙げられる。また、ジッタ周期が 100m といったように比較的短い場合は、地物の高さに応じて変化する Δt の変化量、すなわち姿勢のジッタ計測誤差の角速度 ω に対するステレオ画像間の相対位相差が頻繁に変化してしまうため、地表面の少しの高さの変化に対して DEM のジッタ振幅が大きく変わってしまうことが考えられる。

一方、前節の 1 km ジッタの場合に用いたような姿勢計測値の軌道上の応答誤差を DEM のジッタノイズから逆に推定する手法については、DEM のジッタノイズの周波数が高いことによりランダムノイズの影響を強く受けることで、その周波数特性の安定的な抽出が非常に難しいことが判った。よって、PRISM の DEM に発生している 100 m 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手法として、フィルタによる除去を検討した。以下、その詳細について述べる。

3.3.2 ウェーブレットフィルタ

信号の周期ノイズのフィルタとしては、FFTによるバンドパス（ノッチ）フィルタを用いる方式が最も一般的であるが、本件のようにノイズの特性が空間位置によって変化するデータには必ずしも向かないことが予想される。このような場合は窓FFTを用いることも考えられるが、本件の場合には振幅の変化特性も不定であるためいわゆる「不確定性の原理」[Donoho *et al.*, 1989]に伴って窓サイズ等のパラメータを調整することが困難である。

これら FFT の問題点を解決する手法の一つとしてウェーブレット変換によるフィルタ処理が提案されている [Donoho *et al.*, 1995]。ウェーブレット変換は、空間データの周波数解析において、FFT では失ってしまうデータの空間位置の情報を同時に扱えるという利点があり、これを用いたフィルタは本件のようなノイズ特性が不定に変化するようなデータに対して有効であることが期待される。

ウェーブレット変換によるフィルタ処理を行うに当たっては、離散ウェーブレット変換（DWT）による多重解像度解析（MRA）を行い [Mallat, 1989]、得られたウェーブレット展開の係数がある閾値でフィルタしてから再構成する方式（ウェーブレット縮退）が一般的である。以下、その基本理論について概説する。

まず、任意の一次元実数空間における関数 $f \in L^2(\mathbf{R})$ のウェーブレットによる表現は以下により与えられる [Daubechies, 1992]。

$$f(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} s_{0,k} \phi_{0,k}(x) + \sum_{j < J} \sum_{k \in \mathbf{Z}} w_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (3.19)$$

ここで、 j はウェーブレット変換の最大解像度であり、 $s_{0,k}$ および $w_{j,k}$ は、それぞれ以下により算出される。

$$s_{0,k} = \int f(x) \phi_{0,k}(x) dx, \quad (3.20)$$

$$w_{j,k} = \int f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (3.21)$$

ここで、 $\phi_{0,k}(x)$ 、 $\psi_{j,k}(x)$ はそれぞれスケーリング関数、ウェーブレット関数と呼ばれる $\phi(x)$ 、 $\psi(x)$ を用いて以下により算出できる。

$$\phi_{0,k} = \phi(x - k), \quad (3.22)$$

$$\psi_{j,k} = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \quad (3.23)$$

すなわち、ウェーブレット変換による MRA は、2 倍毎の拡大縮小が正規直交基底となるようなウェーブレット関数、およびその対となるスケーリング関数の組みを用いて行う

直交変換に該当し、その2倍毎の解像度に即した $f(x)$ の各基底成分を抽出する操作とみなすことができる。なお、2次元信号の場合のスケーリング関数、ウェーブレット関数は以下により定義される。

$$\Phi_{j,k,l} = \phi_{j,k}(x)\phi_{j,l}(y) = 2^j \Phi(2^j x - k, 2^j y - l) \quad (3.24)$$

$$\Psi_{j,k,l}^c = 2^j \Psi^s(2^j x - k, 2^j y - l) \quad (3.25)$$

ここで、 $c = h, v, d$ は、 Ψ の水平方向、垂直方向、対角方向を示すインデックスであり、それぞれの方向に該当する Ψ は以下により与えられる。

$$\begin{aligned} \Psi_{j,k,l}^h(x, y) &= \phi_{j,k}(x)\psi_{j,l}(y), \\ \Psi_{j,k,l}^v(x, y) &= \psi_{j,k}(x)\phi_{j,l}(y), \\ \Psi_{j,k,l}^d(x, y) &= \psi_{j,k}(x)\psi_{j,l}(y) \end{aligned} \quad (3.26)$$

以上から、2次元信号 $f(x, y) \in L^2(\mathbf{R}^2)$ に対する MRA は、以下により定義される。

$$f(x, y) = \sum_{k,l \in \mathbf{Z}} s_{j_0,k,l} \Phi_{j_0,k,l}(x, y) + \sum_s \sum_{j < j_0} \sum_{k,l \in \mathbf{Z}} w_{j,k,l}^c \Psi_{j,k,l}^c(x, y) \quad (3.27)$$

ここで、 $s_{j_0,k,l}$ はスケーリング係数、 $w_{j,k,l}^c$ は2次元 MRA におけるウェーブレット係数である。すなわち、2次元信号は、MRA により、直交ウェーブレット関数基底に関して、水平、垂直、対角それぞれの方向における2倍毎の解像度成分に分解される。また、離散信号における DWT の場合は、例えば $f(x)$ において $x = 0 \sim 1$ の区間に等間隔に並ぶ観測値を g_1, \dots, g_n とすると

$$s_{j_0,k} = \sum_{i=1}^n g_i \phi_{j_0,k}(i/n) \quad (3.28)$$

$$w_{j,k} = \sum_{i=1}^n g_i \psi_{j,k}(i/n) \quad (3.29)$$

であり、2次元への拡張も同様である [Ismail *et al.*, 2012]。

100 m ジッタが検知されている PRISM の DEM データについて、最も基本的な直交ウェーブレットとして知られる Haar を暫定的に用いて解像度レベル4まで MRA を行ったときのウェーブレット係数及びスケーリング係数のそれぞれ絶対値のグレースケール表示画像を原データ画像と併せて図 3-22 に示す。なお、任意のレベルまで MRA を行うた

めには、入力データの辺のサイズは2のべき乗となっている必要がある。ここで、PRISMのDEMにおける原データの場合は3710 x 4000であるため、MRA入力データサイズを4096 x 4096としてデータを左上詰めし、データの存在しない部分は0詰めとした。

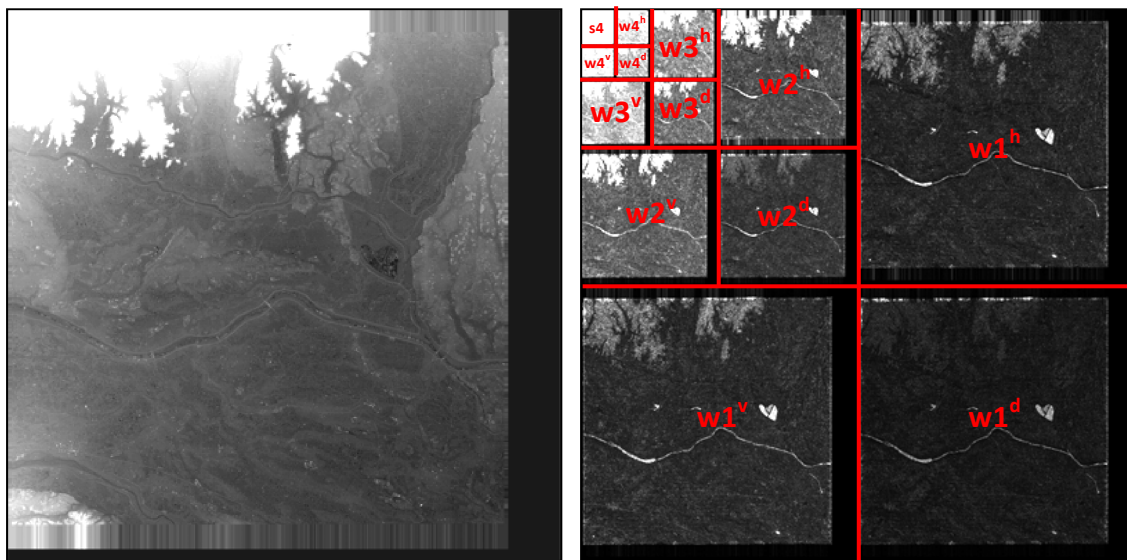


図 3-22 DEM の 100m ジッタサンプルにおけるレベル 4 までの MRA
左: 入力データ, 右: ウェーブレット係数(絶対値)

DWT によるノイズフィルタは、ノイズを含む信号について MRA により異なる解像度（サブバンド、或いはレベル）のウェーブレット係数（フィルタバンク）に分解し、ノイズ成分のみを除去してから基の信号を再構成する操作に該当する。

まず、観測点 t_1, \dots, t_n においてノイズを含んだ観測値を g_1, \dots, g_n とすると、

$$g_i = f(t_i) + \varepsilon_i \quad (3.30)$$

であり、ここで f はオリジナルの信号、 ε_i はノイズ成分（正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う）である。これら観測値に含まれたノイズの除去は g から以下の最小二乗誤差を最小にするような \hat{f} を推定する操作に該当する [Donoho, 1995]。

$$\frac{1}{n} E \|\hat{f} - f\|_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E (\hat{f}(t_i) - f(t_i))^2 \quad (3.31)$$

ただし、ここでオリジナル信号の滑らかさを仮定したノイズ除去の副次的条件として、「 \hat{f} は少なくとも f よりもスムーズである」という条件を付帯する。式 3.30 の DWT は

$$\gamma_I = \theta_I + \delta_I \quad (3.32)$$

であり、 θ はウェーブレット係数、 δ はそのノイズ成分、 I は各レベルに分解されたるウェーブレット係数集合に係るインデックスである。ノイズの分布特性はウェーブレット変換後の直交基底においても保存され、その除去は以下の最小二乗誤差を最小にするような $\hat{\theta}$ を推定する操作に該当する [Donoho, 1995]。

$$E\|\hat{\theta} - \theta\|_2^2 \quad (3.33)$$

ここで、上記のオリジナル信号の滑らかさに係る副次的条件は

$$|\hat{\theta}_I| \leq |\theta_I| \quad (3.34)$$

となり、これらを満たす手続きとしてウェーブレット係数を以下によりフィルタする操作をウェーブレット縮退 (Soft thresholding) という。

$$\hat{\theta}_I^{(\lambda)} = \begin{cases} \gamma_I - \lambda & (\gamma_I > \lambda) \\ 0 & (\lambda \leq \gamma_I \leq \lambda) \\ \gamma_I + \lambda & (\gamma_I < -\lambda) \end{cases} \quad (3.35)$$

ここで、 $\hat{\theta}_I^{(\lambda)}$ は、ノイズを含むレベルのウェーブレット係数、 λ は δ_I に基づくフィルタ閾値である。

3.3.3 高周波ジッタノイズ低減へのウェーブレットフィルタ適用

ウェーブレット縮退をノイズ除去に適用する際にまず問題になるのが、直交ウェーブレット関数に何をを用いるかであるが、本件のような比較的連続的に変化する一般自然画像に近いデータを扱う場合は、ある程度の連続性及び対称性を持った直交ウェーブレット関数が望ましいとされている [Kale et al., 2010]。また、DEM の比較的高周波なほぼ固定周期のジッタノイズに対して有効な感度を持つウェーブレットを選択する必要があることから、ウェーブレット関数のサポート長を定める零モーメント数(M)についても重要

な選択基準となる。

ここで、衛星光学センサ由来の DEM に発生するジッタノイズは横縞状であることから、DEM の 2 次元 MRA により各フィルタバンクに分解されるウェーブレット係数においては、いずれかのレベルの垂直方向成分のみにジッタに該当する成分が含まれていると考えられる。PRISM の DEM で発生している 100 m のジッタの場合は例えば 10 m グリッドで DEM が作成されているデータ上ではほぼ 10 データ周期となることから、ウェーブレット係数の該当するレベルとしては、ウェーブレット関数のスケールが 8 (80 m 解像度) となり、MRA の最高解像度 (20 m 解像度) をレベル 1 とした場合のレベル 3 に主に含まれていることが予想される。

よって、DEM のジッタ周期に該当する MRA において、これまで提案されているいくつかの代表的な直交ウェーブレットの中で上述のフィルタに適した条件を満たすものによる水平(h)垂直(v)の各ウェーブレット係数(w^h, w^v)を比較し、ジッタ成分を含む w^v について、それを含まない w^h との各絶対値の標準偏差 $\sigma_{|dv|}, \sigma_{|dh|}$ の比

$$r_d = \frac{\sigma_{|dv|}}{\sigma_{|dh|}} \tag{3.36}$$

を算出する。ここで、 r_d が相対的に大きい値を示す直交ウェーブレットは、ジッタ成分に対する感度が比較的高い適切なウェーブレットであると考えられる。なお、試行ウェーブレットとしては、Haar に加え、連続性及び対称性を持った直交ウェーブレット関数として知られる Daubechies, Coiflet を用いた [Daubechies, 1992, 1993]。Daubechies, Coiflet の各零モーメント数 M についてはそれぞれ $M=2, 3, 4$ および $M=2, 4, 6, 8$ を試行した。なお、Haar は、Daubechies における $M=1$ の場合に該当する。参考として、Haar, Daubechies ($M=4$), Coiflet ($M=6$) の各プロファイルを図 3-23 に示す。PRISM による DEM の 100 m ジッタデータに対して算出した r_d の試行した直交ウェーブレットの比較について図 3-24 に示す。

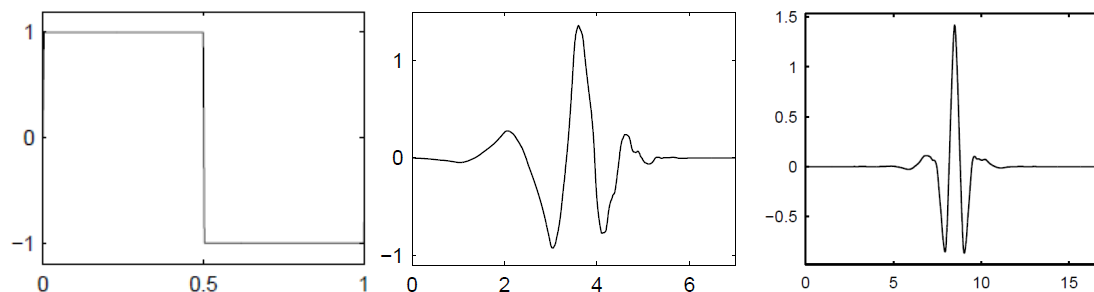


図 3-23 試行した直交ウェーブレットのプロファイル
左から Haar, Daubechies ($M=4$), Coiflet ($M=6$) [Misiti, 2010]

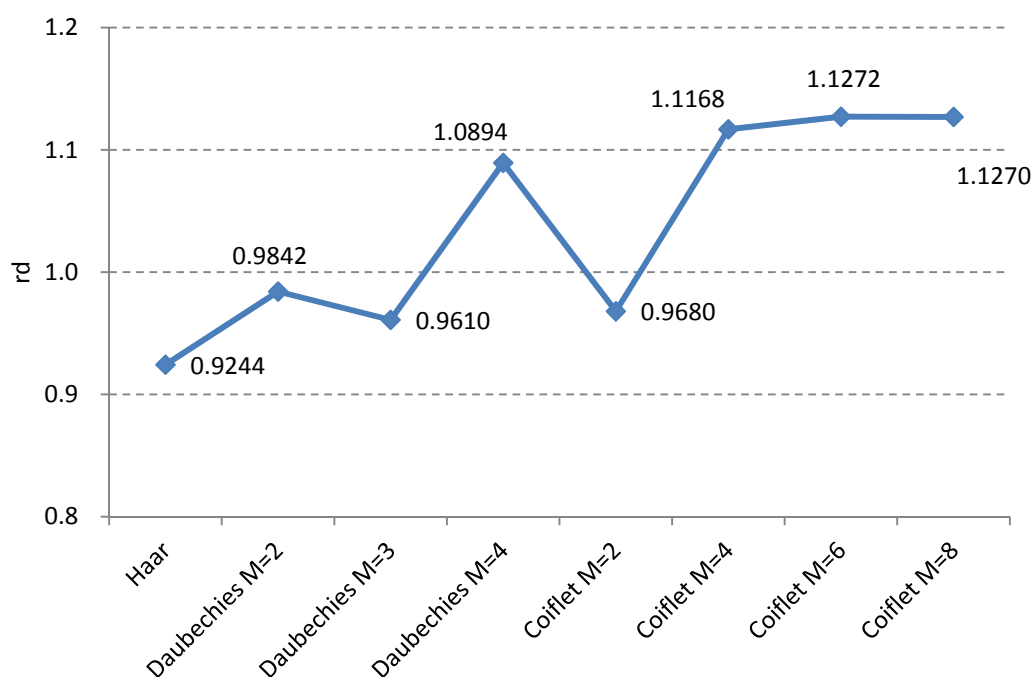


図 3-24 試行直交ウェーブレットによる r_d 値の比較

図 3-24 によれば、試行ウェーブレット中 Coiflet ($M=6$)において r_d 、すなわち水平・垂直の各ウェーブレット係数の大きさに係る標準偏差の比が最も大きくなっており、垂直成分のみに分布しているジッタノイズに対する感度が優れていることが確認できる。よって、以降、PRISM の DEM に発生している 100 m ジッタのフィルタに用いる直交ウェーブレットとしては、Coiflet ($M=6$)を採用することとした。図 3-25 に Coiflet ($M=6$)によるウェーブレット係数のレベル 3 における水平・垂直成分の画像比較について示す。

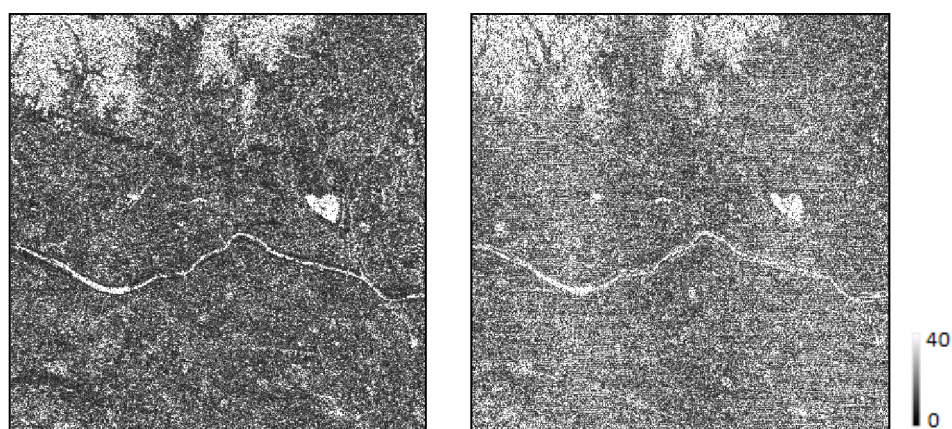


図 3-25 レベル 3 ウェーブレット係数 (Coiflet $M=6$)
左：水平成分，右：垂直成分

次に、フィルタ閾値について検討する。ウェーブレットフィルタにおける閾値の選択は、他の多くのフィルタ手法と同様にフィルタ性能を決める重要な要素であり、これまでも個々のフィルタ対象に沿った様々な提案がなされている [Ismail *et al.*, 2012]。一般に、大きな閾値は原信号におけるノイズ以外の主要な特徴までも除去してしまい、小さな閾値ではノイズが除去しきれない、というトレードオフが存在する。既存提案手法における代表的なものの一つとしては、最高解像度レベルにおけるウェーブレット係数の中央値に沿った統計処理から求めたノイズの標準偏差 σ について、閾値 λ を以下により推定する手法が知られている [Donoho, 1994; Chang *et al.*, 2000]。

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log n} \quad (3.37)$$

ここで、 n は原信号のサンプル数である。但し、この閾値は、基本的に正規分布に基づく白色ノイズの除去を目的として提案されたものであり、本件のように特定の周波数帯のノイズを除去する目的には必ずしも適合しない可能性がある。よって本検討では、衛星光学センサ由来の DEM に発生する比較的高周波なジッタノイズを除去するための閾値選択手法として、ウェーブレット関数の選択と同様に、ノイズを含む解像度レベルのフィルタバンクにおける水平および垂直成分の差を基にした方式について検討した。すなわち、ある一定の広さ (PRISM の場合 35 km x 35 km / シーンを対象) の地形においては、そこに含まれる一定スケールの周期変動 (エッジ) 成分はその方向に対して無相関であると仮定し、2次元 MRA によるウェーブレット係数の垂直方向成分に水平方向成分に対する統計的な偏りがあれば、それを姿勢振動由来のジッタノイズ成分とみなして閾値に設定することとした。まず、DEM の MRA におけるジッタ周期に該当する解像度レベルのウェーブレット係数について、水平及び垂直成分の絶対値 $|w^h|$ 、 $|w^v|$ のそれぞれヒストグラム $h_i(w^h)$ 、 $h_i(w^v)$ を作成する。ヒストグラムにおける各 i の bin としては、PRISM による DEM の場合その最終的な量子化解像度である 1 m とした。図 3-26 に PRISM の DEM で 100 m ジッタが発生しているレベル3におけるそれぞれヒストグラムについて示す。

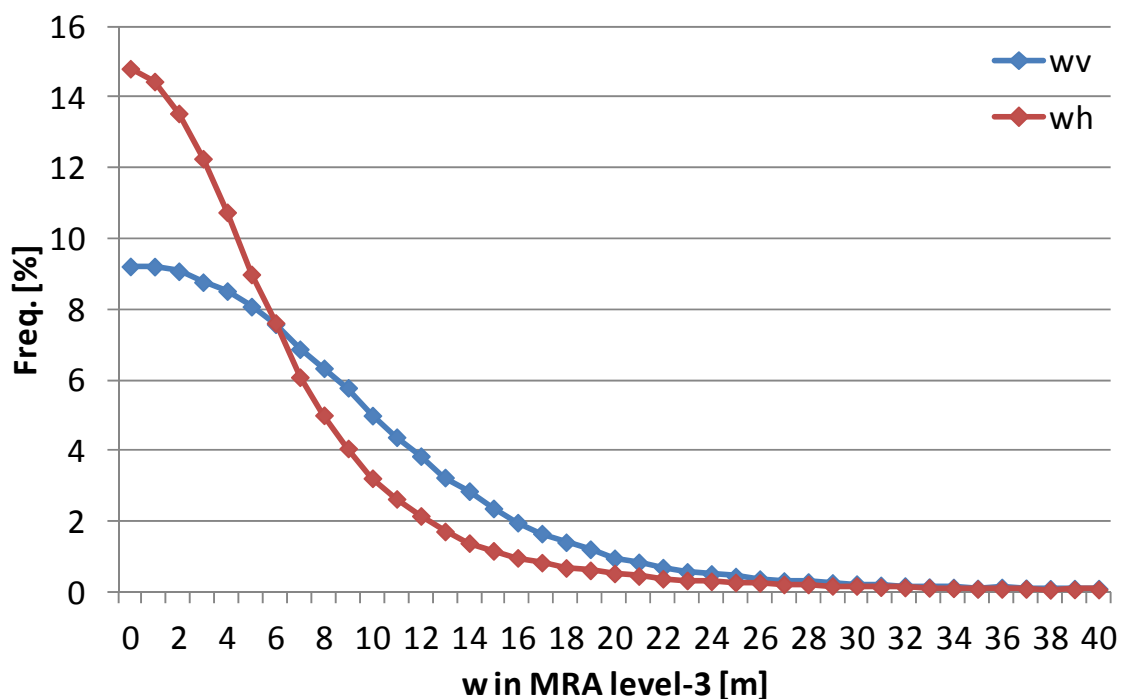


図 3-26 100 m ジッタ DEM の MRA レベル 3 における水平・垂直ウェーブレット係数絶対値のヒストグラム

図 3-26 にみられるように、DEM の比較的高解像度なレベルにおけるウェーブレット係数はほぼ正規分布に従うが、水平成分に対して垂直方向の標準偏差が明らかに大きくなっている様子が伺える。すなわち、これがほぼ DEM に発生している 100 m ジッタノイズの寄与分と考えられ、DEM に発生している高周波ジッタノイズは、該当する MRA 解像度レベルにおけるウェーブレット係数垂直成分のある数値範囲に分布していることが確認できる。

このヒストグラムに対して、ジッタノイズを除去するためのウェーブレットフィルタの閾値 λ としては、以下の条件を満たす最も大きな i を採用することとした。

$$h_i(w^v) - h_i(w^h) > \max_i (h_i(w^v) - h_i(w^h)) \cdot \alpha \quad (3.38)$$

ここで、 α は、ヒストグラム上の水平成分からの垂直成分の差の最大値に対して、その差が生じているエリアの上限値を安定的に定めるための感度係数であり、最大値の 20% となる $\alpha = 0.2$ に設定した。なお、図 3-26 に示したヒストグラムについて、これら基準に該当する閾値は 21 m となる。

3.3.4 フィルタ処理による高周波ジッタノイズ低減効果の確認

前節に挙げた手法に基づき、比較的高周波な周期ノイズである 100 m ジッタが発生している PRISM 由来の DEM に対して以下の手続き：

- (1) 直交ウェーブレット (Coiflet $M=6$) を用いて 2 次元 MRA データを作成,
- (2) ジッタ周期に該当する MRA の解像度レベルにおけるウェーブレット係数のヒストグラムを作成,
- (3) ヒストグラムの垂直水平成分の比較によりフィルタ閾値を決定,
- (4) 決定した閾値を用いて MRA におけるウェーブレット係数の垂直成分を更新 (ウェーブレット縮退),
- (5) ウェーブレット逆変換を用いて MRA から DEM を再構成,

を行い、フィルタ済み DEM を作成した。DEM のフィルタ前後の DEM について図 3-20 の 3 エリアを拡大したグレースケール表示画像を図 3-27 に示す。

ジッタノイズ低減効果の定量評価としては、図 3-27 に示した各エリアについてフィルタ前後の DEM に対する AT 方向の FFT 振幅スペクトル平均の比較を行った。FFT のサンプルライン数 N は 512, 平均化カラム数 M は 512 とした。図 3-28~図 3-30 にそれぞれの結果を示す。なお、FFT による振幅スペクトル解析は、前述の理由により本事象に対するフィルタへの適用は難しいが、ある範囲の局所エリアに限定したノイズ評価のための用途としては十分有効である。

また、図 2-9 に示したプロファイルについてフィルタ前後の DEM に対する比較を図 3-31 に示す。

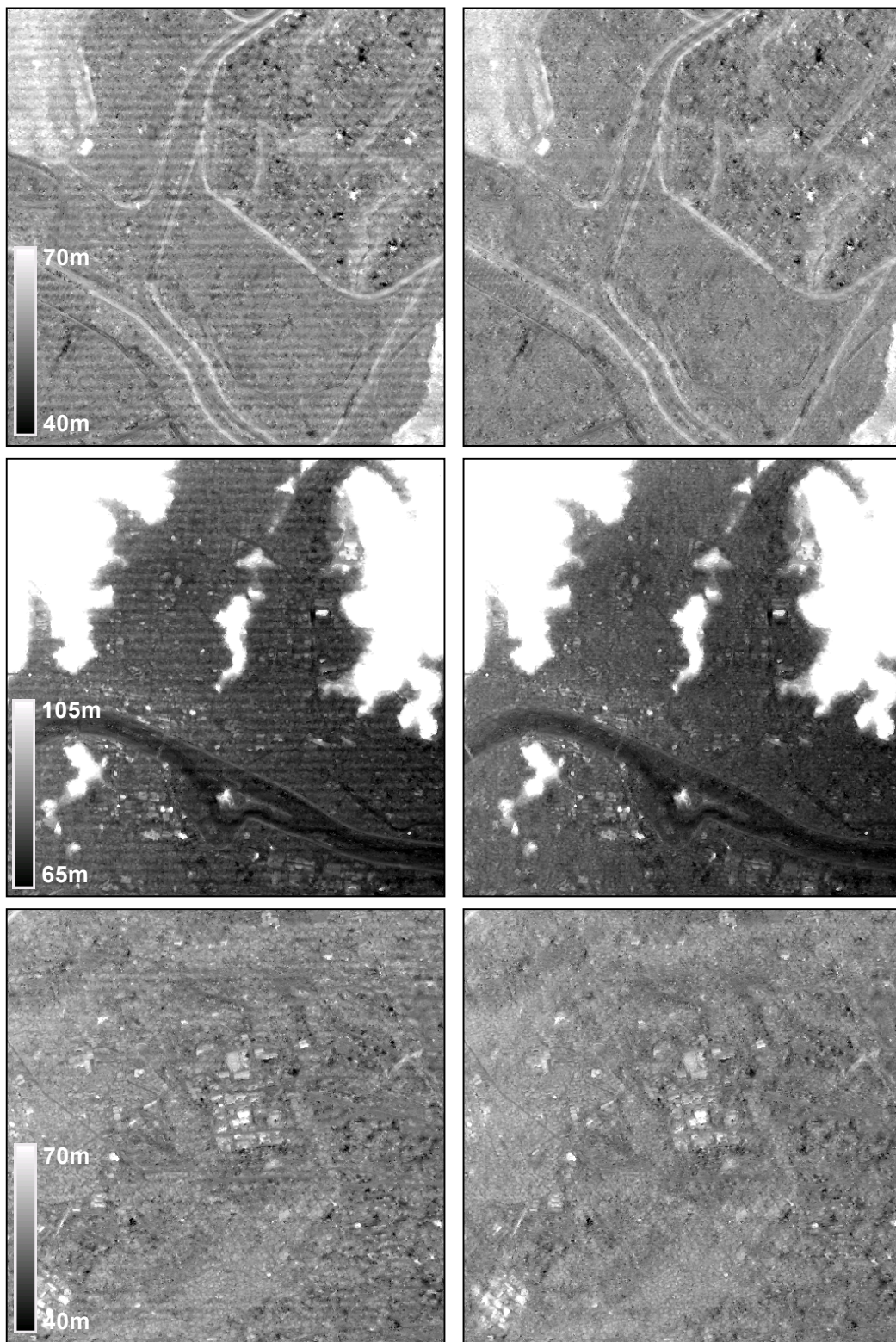


図 3-27 ウェーブレットフィルタ前後の DEM 比較
左列: フィルタ前, 右列: フィルタ後 / 上段: (a), 中段: (b), 下段: (c)

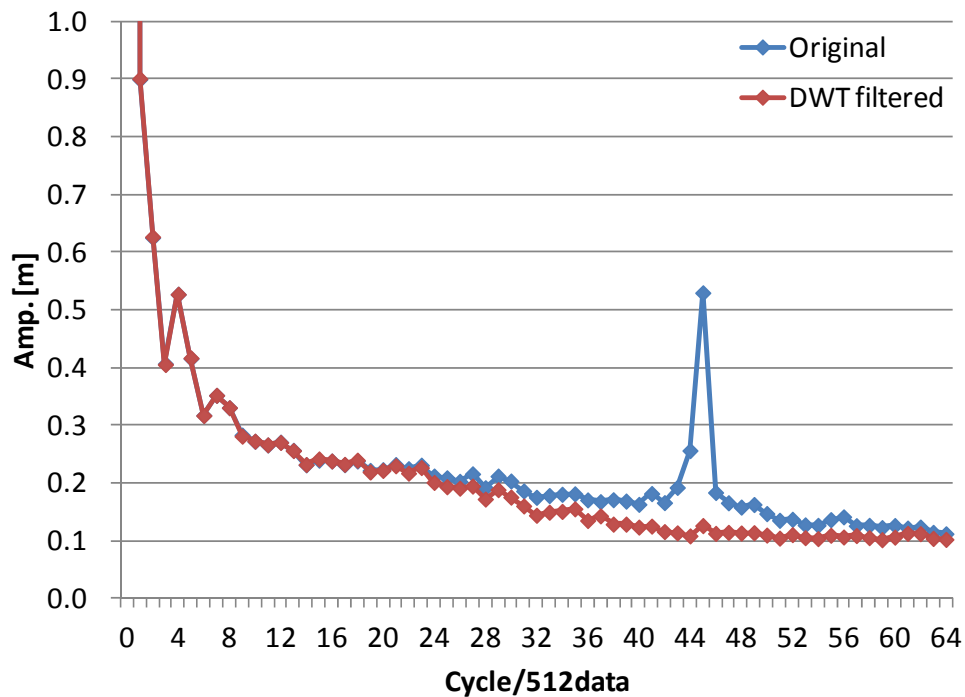


図 3-28 100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均一エリア(a)

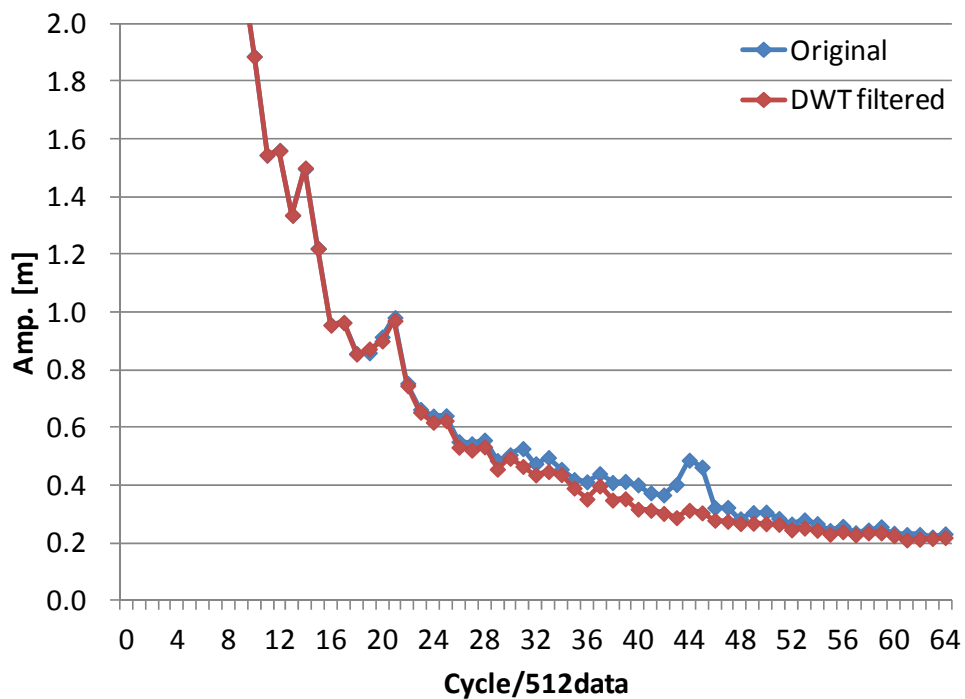


図 3-29 100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均一エリア(b)

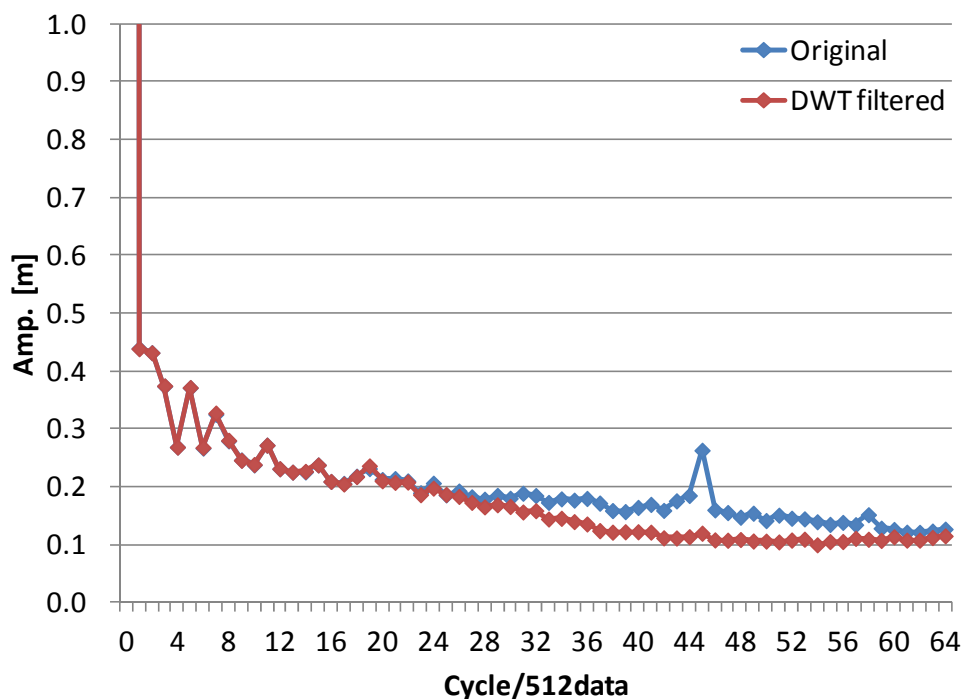


図 3-30 100 m ジッタ DEM サンプルの AT 方向 FFT 振幅スペクトル平均一エリア(c)

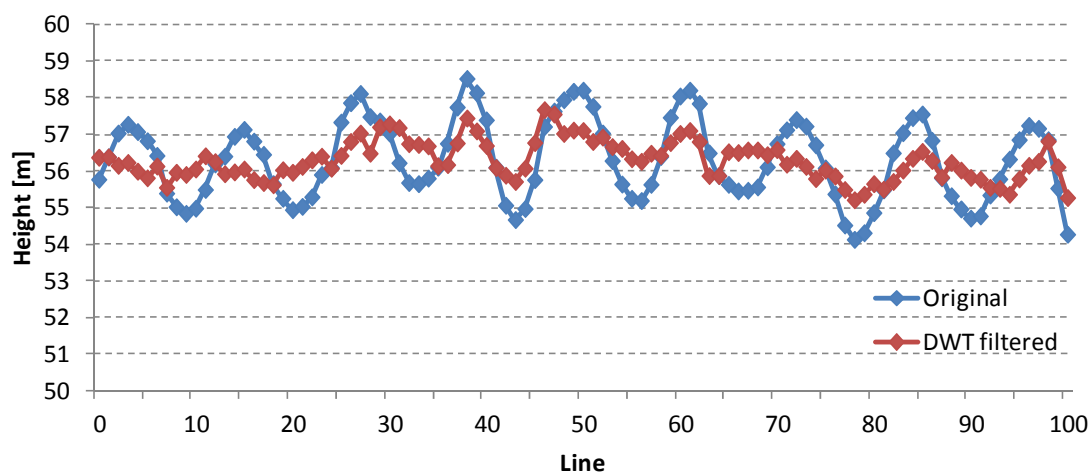


図 3-31 100 m ジッタの高さプロファイルの比較

図 3-27 によれば、フィルタ前後の DEM において、100 m 周期のジッタノイズが大きく除去されている様子が視覚的に確認できる。図 3-28～図 3-30 の FFT 振幅スペクトルでは、100 m ジッタの周波数帯は 44~46 cycle / 512 data 付近に該当するが、フィルタ後のスペクトルにおいてこれら周波数帯以外で若干のエネルギー損失（解像度の低下）は見

られるものの、ジッタによって発生しているピークは適切に解消していることが確認できた。また、図 3-31 によるプロファイルでは、フィルタ後においてオリジナル地形によると思われる $\pm 1\text{m}$ 程度の揺らぎを残して、明らかな 100m 周期のノイズ成分は除去できていることが確認できた。

最後に、信号の周期ノイズのフィルタとして最も一般的な FFT フィルタ（バンドパスフィルタ）による結果との比較について、結果の違いが顕著となった図 3-27 におけるエリア(b)のグレースケール画像を図 3-32 に示す。なお、FFT フィルタでは、ウェーブレットフィルタ同様に $35\text{ km} \times 35\text{ km}$ の1シーンを対象として、カラム毎に AT 方向 4096 サンプルの一次元 FFT を行い、 100 m ジッタの周波数帯に該当する $357\sim 358\text{ cycle} / 4096\text{ data}$ の成分をカット(=0)して、逆 FFT したものである。

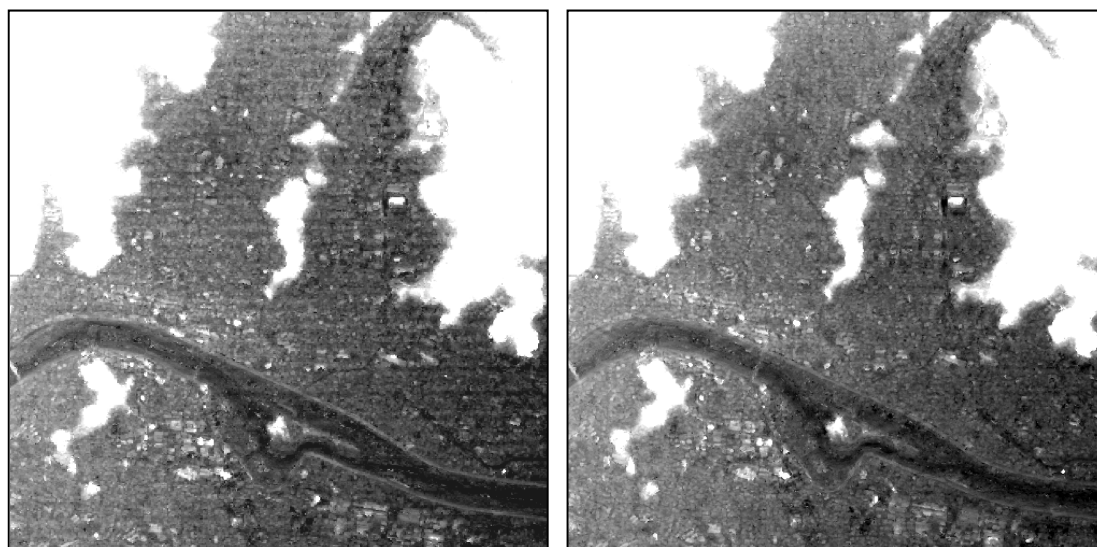


図 3-32 フィルタの違いによる DEM の比較 左: FFT フィルタ, 右: DWT フィルタ

図 3-32 によれば、FFT では 100 m ジッタが取りきれていないが、DWT では十分に除去できていることが確認できた。また、その他のエリアについてもほぼ同様の結果を示していることを確認した。

但し、FFT と比較して、DWT は、全体的に微細なフィルタノイズや図 3-28 ~ 図 3-30 に示したエネルギー損失に対応した僅かな解像度低下（ボケ）が見られることは否めない。また、DEM のエッジデータの一部については、DWT フィルタにより逆に周期ノイズが増加してしまうエリアも僅かに見られた。図 3-33 に該当のエリア（河川の土手）を示す。これは、河川の土手のエッジプロファイルを構成していたウェーブレット係数成分が DEM ジッタ成分と同時に過剰にフィルタされてしまったことによる影響であると考えられる。これらは、今後の課題であると共に、FFT と DWT のそれぞれフィルタを状況に応じて使い分ける等の手法も検討の余地があると考えられる。

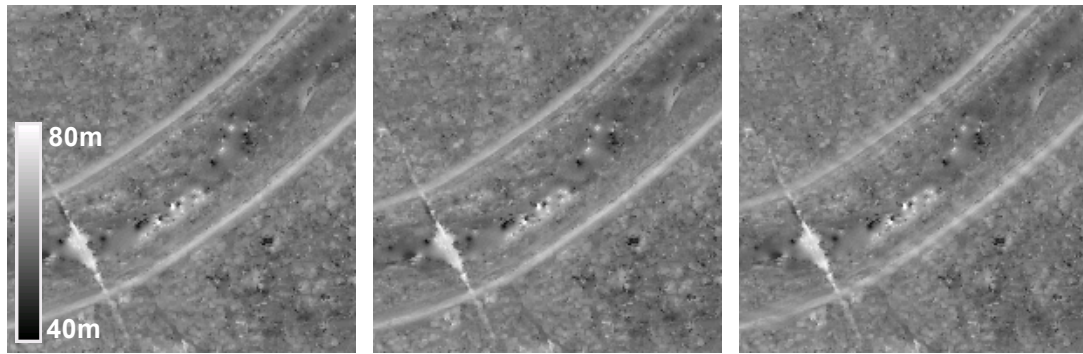


図 3-33 フィルタの違いによる DEM の比較
左: 原データ, 中央: FFT フィルタ, 右: DWT フィルタ

3.4 DEM システムノイズ低減手法のまとめ

衛星光学センサの比較的低周波な姿勢振動に伴う DEM のジッタノイズについて、衛星の姿勢データがジッタに該当する周波数帯をカバーしているにもかかわらず、その応答誤差が原因でノイズの修正に適用できないような場合に、逆にそのノイズの傾向を解析することで姿勢データの応答誤差を修正し、ノイズ修正に適用する手法を提案した。

姿勢データの利用が全般的に無効となるような比較的高周波な姿勢振動に伴う DEM のジッタノイズについては、通常の FFT フィルタなどでは除去し難い振幅位相などが不定の周期ノイズとなって現れるが、適切なウェーブレット関数および閾値による DWT フィルタを適用することで、これらを効率的に低減する手法を提案した。なお、ウェーブレット関数の選択および閾値の決定に対しては、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 MRA の水平・垂直成分の差異を指標に行う手法を適用した。

これら DEM ジッタノイズの各周波数帯における低減手法について、実際にノイズが発生している PRISM の DEM データを用いてその有効性を確認した。

衛星搭載機器の中では、太陽電池パドルやリアクションホイールなど軌道上での擾乱が避けられない機器が必須となること、且つ、これらの軌道上すなわち慣性系における衛星本体内での詳細な伝達・共振特性を地上で打ち上げ前に完全に計測・模擬することが難しいことを鑑みると、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 PRISM で検知されたようなケースが十分に考えられ、本章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。

なお本研究では、約 7~8 Hz の姿勢振動に伴う PRISM による DEM のジッタノイズを低周波ノイズとして姿勢計測値を利用した補正手法を提案し、約 60 Hz の視線振動に伴う同ノイズを高周波ノイズとしてフィルタによる補正手法を提案しているが、低周波ー高周波の一般的な定義は必ずしも明確でない。すなわち、DEM のグリッドサイズや高さ精度、および姿勢データのサンプリング周期などに依存した高周波ー低周波のそれぞれノイズ低減手法の適用周波数帯の整理については今後の課題としたい。更に、PRISM では、各周波数帯の DEM ジッタノイズについてそれぞれほぼ単一周波数帯のノイズが対象となっているが、将来センサにおいては複数帯域にわたってジッタノイズが存在するような場合も考えられる。そのような場合のより高度な応答誤差推定手法やフィルタの検討についても今後の課題としたい。

また PRISM では、標準的な姿勢データのサンプリング周波数が DEM のジッタノイズの帯域をカバーできていなかったこと、およびその振幅精度の仕様値についても DEM のジッタノイズを修正するには十分でなかったことなど、姿勢センサの設計仕様自体に考慮不足があったことが否めない。また、今回使用した姿勢データは 2 章に述べたとおり JAXA から提供を受けたものであるが、センサモデルパラメータ等と併せて基本的には詳細が非公開であることも一般利用側での解析に当たり障壁となっていると考えられる。今後の衛星光学センサによる DEM ミッションでは、これら DEM 作成に特化して必要となる精度や解析に必要な情報を十分踏まえた上で、姿勢データなどのハードウ

エア仕様や関連データおよびパラメータ等の情報開示に反映していく必要があると考えられる。

第4章 DEM ランダムノイズ低減手法の開発

4.1 DEM ランダムノイズの低減

第2章で述べたランダムノイズについては、衛星光学センサによるグローバル DEM 作成ミッションにおいては観測日の異なる同一エリアの DEM データをスタックして平均することで、大数の法則に基づく誤差の低減が期待できるが、光学センサの場合は被雲や日照条件などによりエリアによっては十分なスタックが得られない場合があること、また、DEM の時系列解析などの利用用途によっては時期の異なる DEM を独立に扱う必要があること、などから必ずしも有効でない場合が考えられる。

一方、これらランダムノイズはほぼステレオ画像のマッチング精度限界に伴うものと考えられ、エリアベースによる画像マッチング自身の精度をこれ以上飛躍的に高めることは難しい。第2章で用いた PRISM によるサンプル DEM について、地形がほぼ平坦な水田における局所エリア (250 m x 250 m) の三方向視画像 (前方, 直下, 後方) と作成 DEM の陰影図 (Shaded Relief) を図 4-1 に示す。

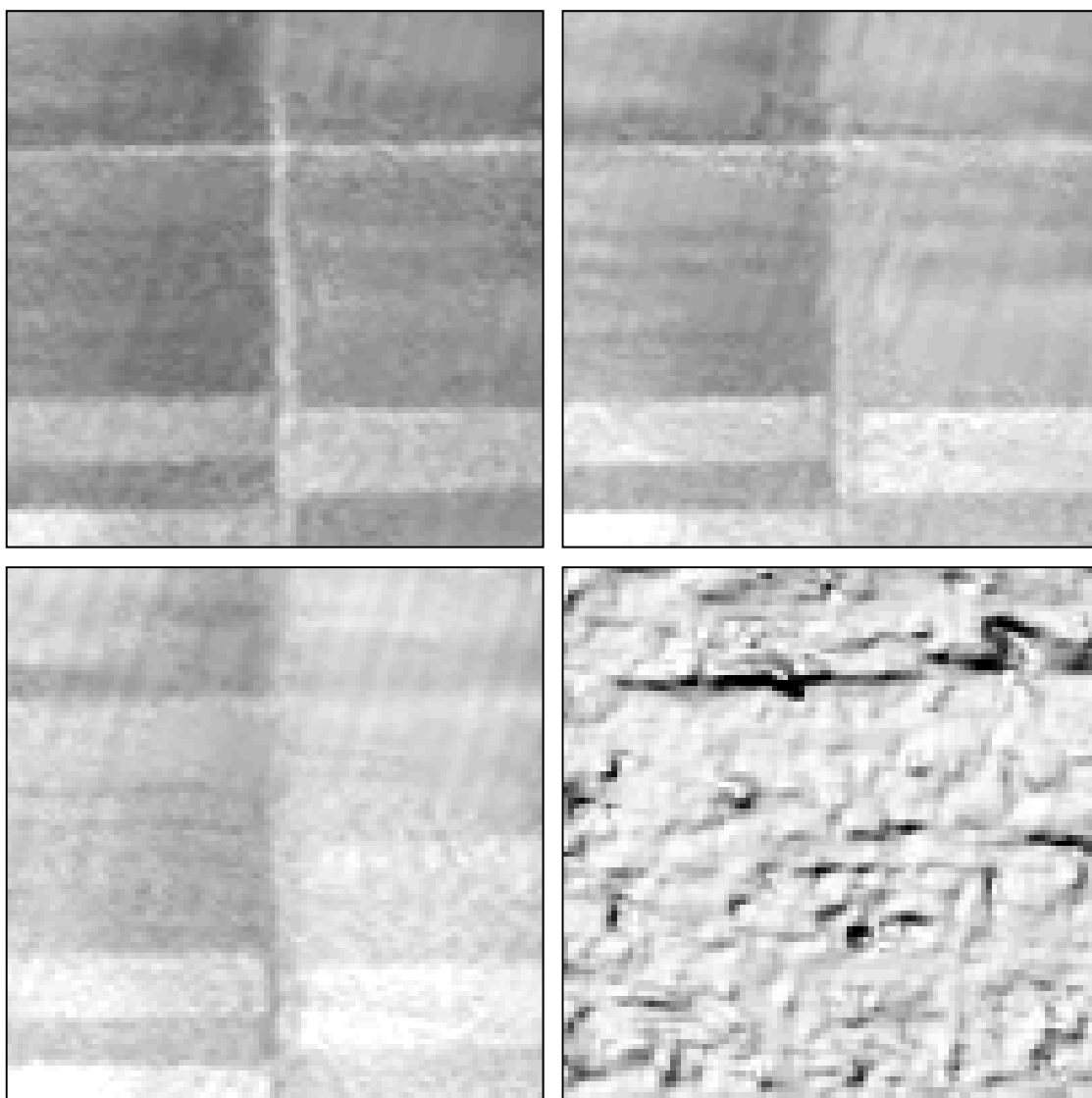


図 4-1 PRISM 三方向視画像と作成 DEM 拡大図 (250m x 250m)
 上左：前方視，上右：直下視，下左：後方視，下右：DEM 陰影図 (Shaded Relief)

図 4-1 によれば，同一地域を三方向から観測したステレオ画像の間には，センサのディテクタ感度校正残差や S/N などラジオメトリック性能によるパターンの違いと，異なるセンサの入射角に伴う地表面反射の違いによるパターンの違いがあることが確認できる。水田など元来地表面のテクスチャが少ないエリアは，マッチング処理にてステレオ画像間のこれらパターンの違いによる影響を受けやすく，結果的に DEM のランダムノイズが比較的多くなっていることが予想できる。図 4-1 のエリアにおける DEM の精度は，25 cm RMS の高さ精度を持つ LiDAR からの誤差として約 3.0 m RMS と見積られているが，PRISM の B/H = 0.5 からステレオ画像間の視差に換算すると 0.6 画素 RMS となる。ステレオマッチングの精度としては，これらステレオ画像の状況からみてもこれ以

上の精度の向上を目指すのは難しい。よって、作成 DEM の更なる高度化を目指す場合、これらランダムノイズの傾向に沿った適応的フィルタ等、高度な後処理の開発が重要となる。

画像処理一般においては、これらランダムノイズ低減のためのフィルタアルゴリズムは数多く提案されているが、衛星由来の DEM に係る同技術の研究事例は必ずしも多くない。過去には、SRTMに発生しているランダムノイズについて、DEMの多重解像度解析による統計処理を用いた適応的フィルタにより、ノイズ除去と地形表現の空間解像度の低下とのトレードオフを解消する試みがなされている [Gallant, 2011]。一方、衛星光学ステレオ画像とは異なるが、地上での主に水平撮影によるステレオ写真を扱うコンピュータビジョンの分野では、3D ビジョンにおける対象物の三次元形状を表現し DEM の高さに該当する深度マップについて、ノイズを適応的に除去するフィルタの提案がなされている [Matsuo *et al.*, 2013]。提案フィルタの手法は、画素毎の各近傍におけるある一定の誤差分布を仮定して加重平均を行ういわゆるカーネル畳み込み方式であるが、画像内のエッジを有効に保存しながらノイズ除去を効率的に行うために、ノイズ量そのものに対するカーネルと、ノイズの空間的な広がりに対するカーネルの2つのカーネルを同時に用いるバイラテラルフィルタ [Tomasi *et al.*, 1998] を応用している。なお、更に、前者のカーネルにはフィルタ対象である深度マップ自身を、後者のカーネルにはその基となったステレオ画像を対象にするといった、ジョイントバイラテラル方式 [Pestschnigg *et al.*, 2004] を採用することによりフィルタ性能の高度化が図れることを示している。地上で水平撮影した自然画像と衛星から地上を撮影したリモートセンシング画像では、その画像解像度など扱うスケールは大きく異なるが、基本的な考え方は同じステレオ画像マッチングデータを扱う両方で十分に共有できると考えられる。

本研究では、DEM のランダムノイズ除去に対してノンローカルフィルタの適用を行う。ノンローカルフィルタは、バイラテラルフィルタ同様に、自然画像を対象として提案されたカーネル畳み込みによる手法の一つであり、エッジなどのオリジナル画像特徴を効率的に保存しながらノイズ除去を行う適応的フィルタとして知られている [Buades *et al.*, 2005]。ノンローカルフィルタの DEM への適用は、SAR 干渉処理から作成された TanDEM-X の DEM データセットをオリジナルの 12 m 解像度から 6 m 解像度に高解像度化するに伴い精度向上を行うために試行されたのが最初のケースである [Deledalle *et al.*, 2011; Zhu X. *et al.*, 2014]。同ケースでは、ノンローカルフィルタの概念を用いて、SAR 干渉処理における SAR 振幅画像、コヒーレンス画像、干渉位相差画像の精度向上を繰り返し演算により行い、それらを入力として処理される DEM のランダムノイズ低減を図っている。本研究では、ノンローカルフィルタについて、光学センサによる DEM に発生するランダムノイズに対して効果的に適用する方式を提案する。本手法は、繰り返し演算などを伴わない比較的シンプルなものであり、汎用性の高さが期待できる。また、フィルタに係るパラメータについてはフィルタに使用する DEM に加え、その基となるステレオ画像のノイズレベルから自動的に見積ることによって更に汎用性を高めている。以下、その手法および評価の詳細について述べる。

4.2 ノンローカルフィルタの DEM への適用

ノンローカルフィルタは、前節のとおり元来自然画像を対象に提案された手法である。本節では、ノンローカルフィルタについて光学センサ由来の DEM に効果的に適用するための手法を記す。

4.2.1 ノンローカルフィルタ

ノンローカルフィルタは、ラスタ画像における加重平均に基づく手法であり、フィルタ対象であるラスタ画像アドレス i についてのフィルタ済み画素値 h_{NL} は、以下により与えられる。

$$\hat{h}_{NL}(i) = \frac{1}{Z(i)} \sum_{j \in \mathbf{N}_i} w(i, j) h(j) \quad (4.1)$$

ここで、 $w(i, j)$ は、画像アドレス i と、 i を中心としたサイズ $N \times N$ のカーネル \mathbf{N}_i 内の各画像アドレス j との類似度に基づく重みであり、 $Z(i)$ は加重平均の係数 $w(i, j)$ を正規化するための定数として以下により与えられる。

$$Z(i) = \sum_{j \in \mathbf{N}_i} w(i, j) \quad (4.2)$$

すなわち、この $w(i, j)$ が、画素 i に対してカーネルを構成する画素 j をノンローカルなエリア \mathbf{N}_i から再定義する本フィルタ手法のキーとなるパラメータであり、 i に隣接するローカルな画素群を一律にカーネルとして扱う一般的な平滑化フィルタ手法と異なる点である。この類似度 $w(i, j)$ は、 i および j それぞれのアドレスを中心としたサイズ $n \times n$ ($n < N$) の画素値ベクトル $h(\mathbf{n}_i)$ 、 $h(\mathbf{n}_j)$ について、これらベクトル間のユークリッド距離に基づくガウシアンにて定義される。

$$w(i, j) = \exp\left(-\frac{\|h(\mathbf{n}_i) - h(\mathbf{n}_j)\|_2^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.3)$$

ここで、 σ は、フィルタ強度を調整するためのガウシアンにおける標準偏差である。すなわちノンローカルフィルタでは、ある一定範囲で類似した近隣パターンを持つ画素同士における誤差の分布は一定とみなしてそれらの加重平均により誤差を低減しつつ、類似しない近隣パターンを持つ画素はオリジナル画像の特徴を隔てている画素として加重平均には加えずに保存する。

ノンローカルフィルタは元来自然画像を対象に提案されたものであることから、まずは例として PRISM 画像に対して $N = 21$, $n = 7$, $2\sigma^2 = 25^2, 50^2, 100^2$ として適用した結果を図 4-2 に示す。図 4-2 のオリジナル画像上に示したアドレス p に対しては、それぞれ類似の $n \times n$ ベクトル (図内赤色矩形) を持つアドレス $q1, q2$ の重みは高くなり、逆に $q3$ における重みは低くなる。

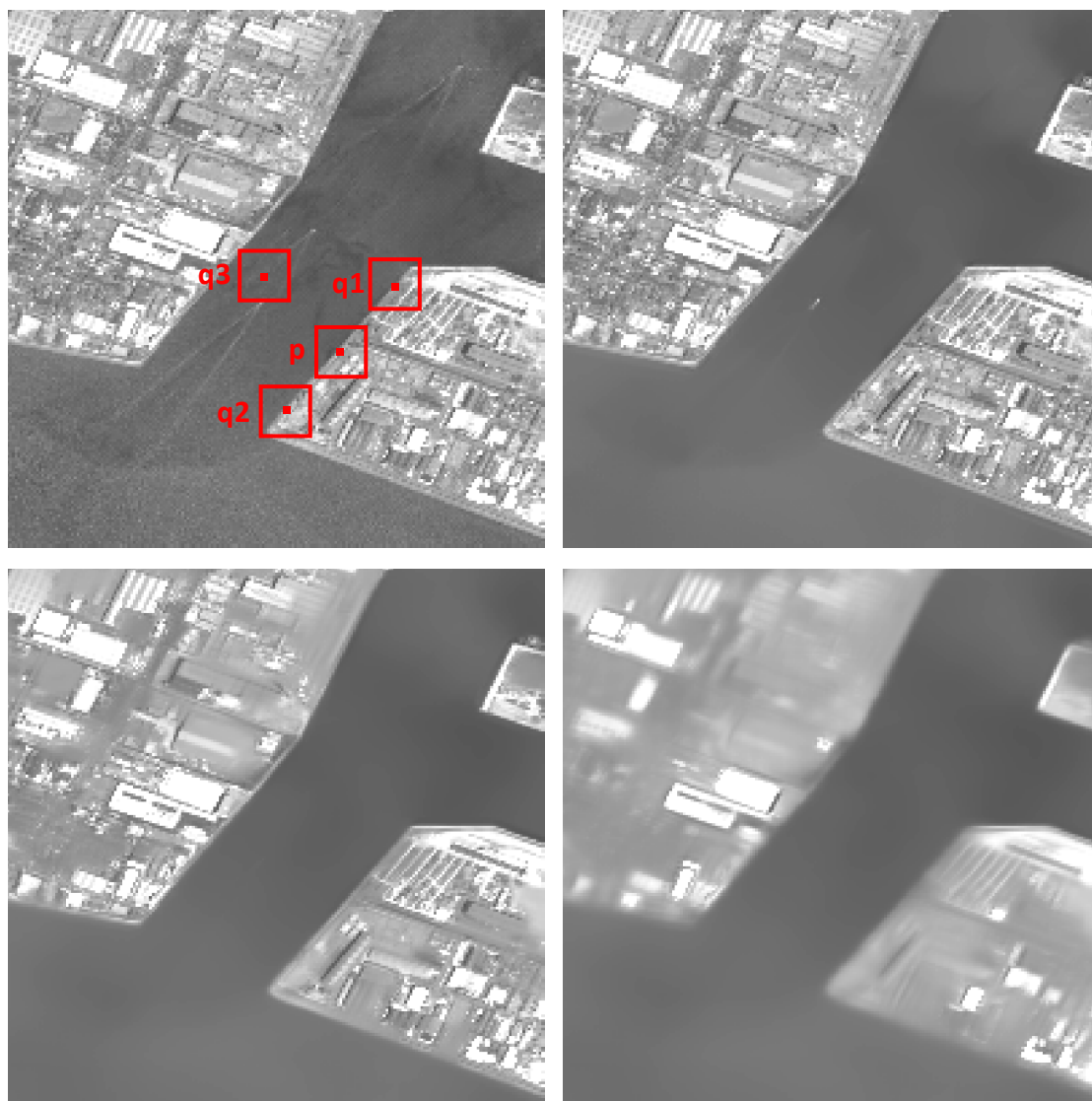


図 4-2 ノンローカルフィルタの PRISM 画像への適用例 (500 m x 500 m)
 上左 : オリジナル, 上右 : $2\sigma^2 = 25^2$, 下左 : $2\sigma^2 = 50^2$, 下右 : $2\sigma^2 = 100^2$

図 4-2 からは、 σ を大きくするに従いまず海上の波などの細かい特徴がフィルタされ、次いで陸地内の細かい人工構造物などが徐々にスムージングされていくが、海岸線のエッジや輝度コントラストの強い比較的大きな人工構造物などはそのまま残されていることが確認できる。

4.2.2 光学センサ DEM への適用

ノンローカルフィルタを DEM に適用するに当たっては、式 4.1 ~ 4.3 における $h(i)$ を DEM データに置き換えて考えればよいが、ここで式 4.3 の類似度は、DEM データ自身ではなく、その基となるステレオ画像から与えることが適切であると考えられる。理由としては、4.1 項に示したように DEM におけるノイズの分布は、DEM 自身の特徴というよりも、その基となるステレオ画像の特徴に大きく依存するためである。よって、ステレオ画像内の一つ（直下視画像）において、ある一定範囲における画像内の特徴が類似している場合は、該当する DEM も十分に滑らかか或いは一定の高さとなる、という仮定を置き、式 4.3 の w を以下の w_v に置き換える。

$$w_v(i, j) = \exp\left(-\frac{\|v(\mathbf{n}_i) - v(\mathbf{n}_j)\|_2^2}{2\sigma_v^2 n^2}\right) \quad (4.4)$$

ここで、 v は DEM 作成の基となったステレオ画像の一つ（PRISM の場合は直下視画像を使用）について同一フレームにオルソ投影したデータである。また σ_v は同様にフィルタ強度を制御するパラメータである。なお、画像類似度のユークリッド距離については、ベクトル \mathbf{n} のサイズ $n \times n$ が σ_v の設定に影響しないように画素数 n^2 で正規化している。上記仮定は、画像にテクスチャなどの特徴が少なければ、ステレオ画像間の視差も生じず、DEM においても極端な勾配やエッジは起こり得ないということから、直感的にも自然なものと捉えられる。4.1 項に述べたとおり、これらテクスチャの少ないエリアでの DEM のランダムノイズは、ステレオ画像間のラジオメトリック性能、或いは入射角の違いに基づく微小なパターンの違いにより生じているものであるが、単一画像内でのパターンの類似性に基づく加重平均を用いた本フィルタ手法では、それらの影響を比較的受けずに効果的なノイズのスムージングを行うことができる。PRISM で水田域を撮影したデータから作成した DEM において、DEM 自身の類似度でフィルタした場合と、直下視画像の類似度でフィルタした場合のグレースケール表示画像の比較を図 4-3 に示す。なお、パラメータについては暫定的に $N = 51$, $n = 5$, $\sigma^2 = \sigma_v^2 = 200$ とした。図 4-3 からは、直下視画像の類似度による結果が DEM 自身の類似度による結果をノイズ除去性能で明らかに上回っていることが視覚的に確認できる。

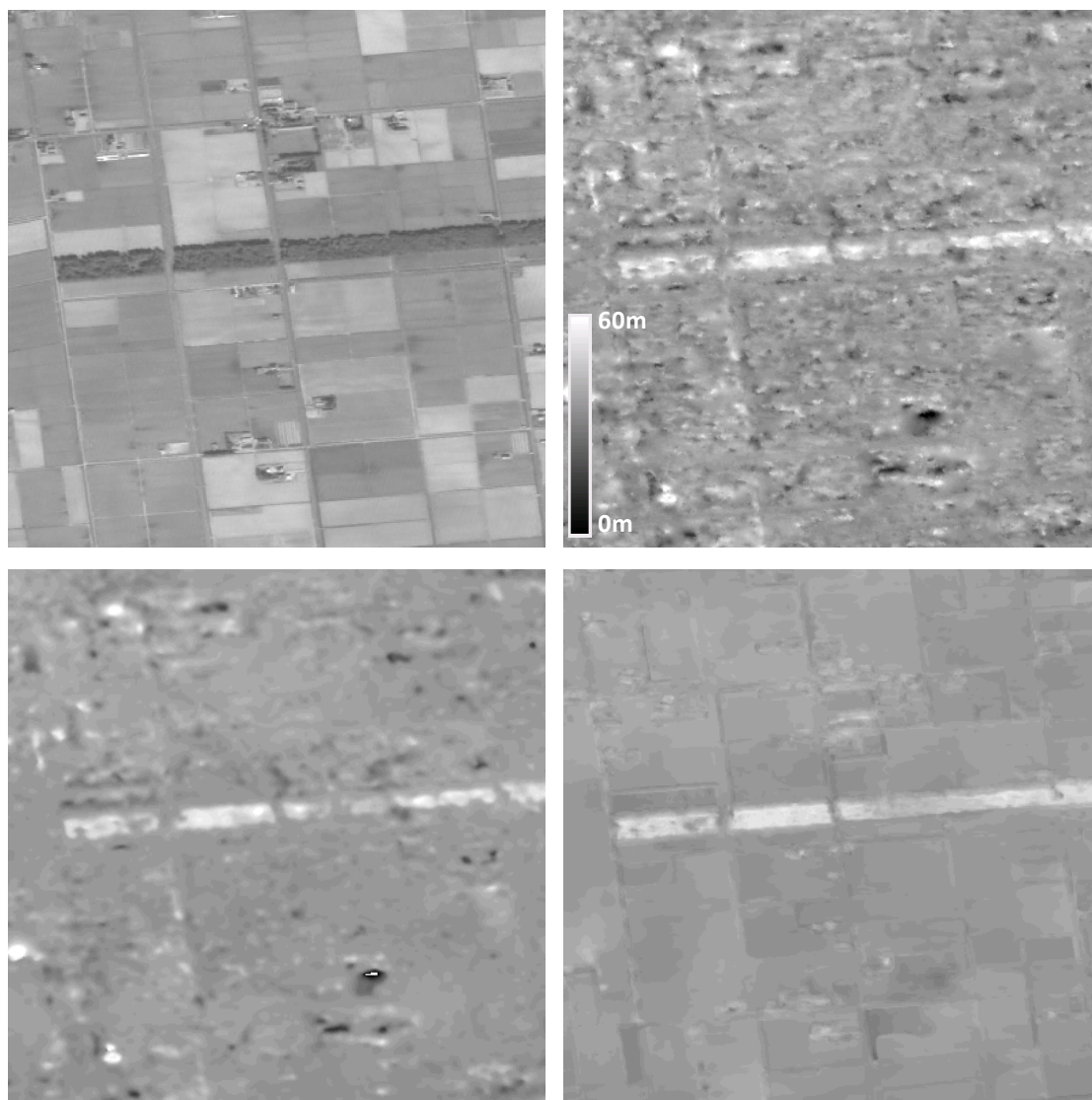


図 4-3 ノンローカルフィルタの PRISM DEM への適用例 (2 km x 2 km)
 上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM，
 下左：DEM 類似度によるフィルタ結果 DEM，
 下右：直下視画像類似度によるフィルタ結果 DEM

但し、ここで地形特徴によっては上記仮定が当てはまらないケースが考えられる。急峻地形では、一定範囲内において高さの違いがあるにも関わらず画像特徴が類似している場合があり、これをそのままフィルタした場合にはオリジナルの地形情報を失ってしまう恐れがある。例えば、山岳域における森林などでは、その樹冠のパターンが類似しているにも関わらず、地盤標高の違いにより高さが大きく異なる場合がある。また、傾斜地における棚田などでは、各段における畑の標高が違うにも関わらず、畑自身の画像特徴は非常に類似している場合が考えられる。その他、都市域におけるビルなどでも同様の問題が起こり得る。よって、式 4.4 における重みについては、画像の類似性による

もののみではなく、DEMの高さ自身に係る以下の重み w_h を考慮する。

$$w_h(i, j) = \exp\left(-\frac{\|h(i) - h(j)\|^2}{2\sigma_h^2}\right) \quad (4.5)$$

すなわち、 w_h は、画素アドレス i と j の間の高さの差に伴う重みであり、 σ_h はその効き方を制御するガウシアン標準偏差である。よって、式 4.1 における w は改めて以下により置き換えられる。

$$w(i, j) = w_v(i, j)w_h(i, j) \quad (4.6)$$

図 4-4 に、PRISM で山岳森林域を撮影したデータから作成した DEM において、 w_h の考慮がある場合と無い場合によるフィルタ済み DEM のグレースケール表示画像の比較を示す。なお、 σ_h は暫定的に DEM の精度仕様値である 5 m とした。以外のパラメータは図 4-3 の場合と同様である。図 4-4 からは、フィルタ処理において w_h を考慮しない場合に明らかにオリジナルの地形起伏を失っているが、 w_h を考慮した場合にそれが抑えられている様子が視覚的に確認できる。

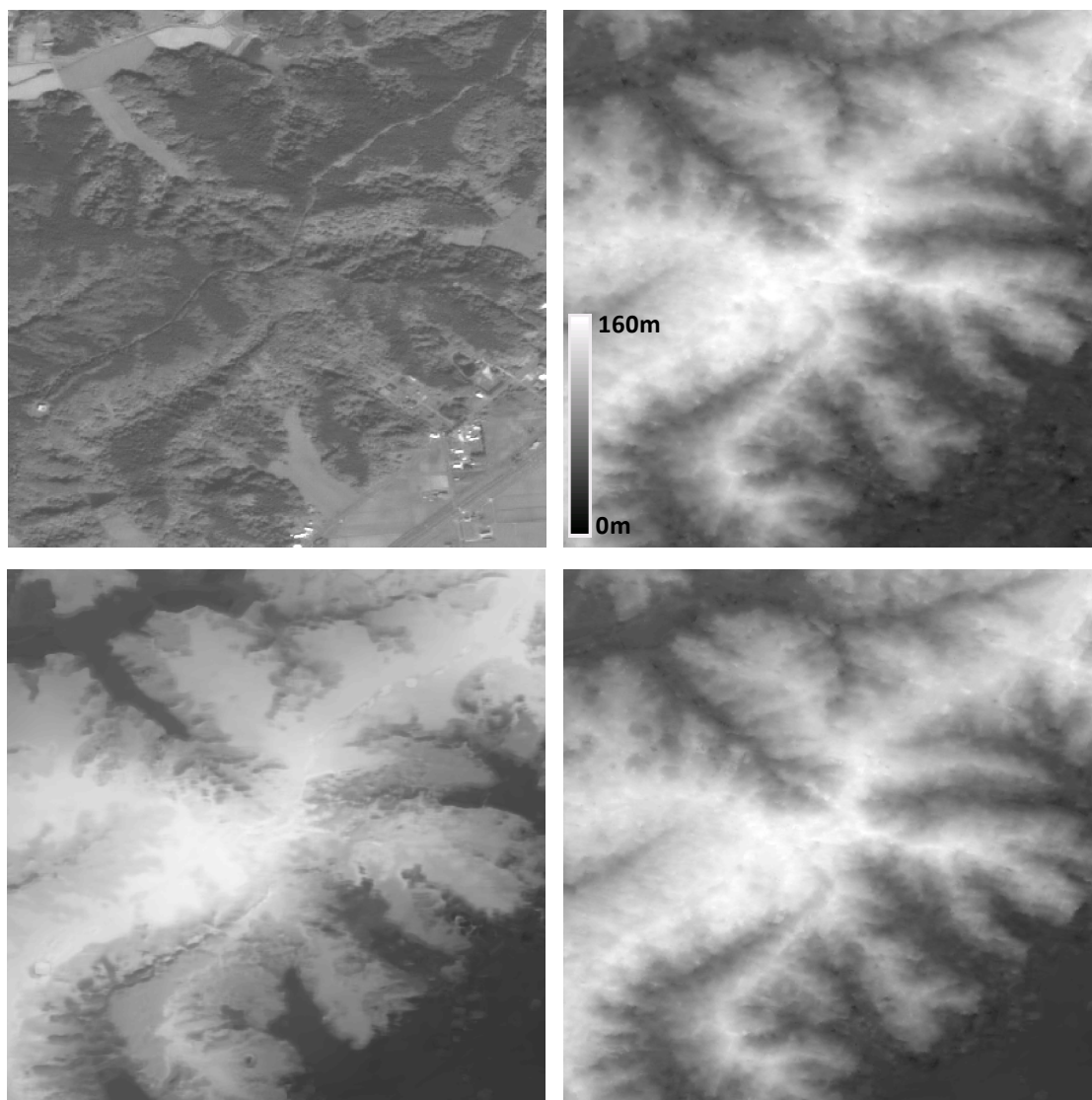


図 4-4 ノンローカルフィルタの PRISM DEM への適用例 (2 km x 2 km)
 上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM，
 下左： w_h を考慮しないフィルタ結果 DEM，下右： w_h を考慮したフィルタ結果 DEM

概して、本フィルタは、画像パターンと DEM の高さといった二つの類似性に基づくスムージングによりノイズを低減する手法と言える。ここで、それらの類似性に伴うフィルタ強度を制御するパラメータ σ_v 、 σ_h の設定が、適切なフィルタ結果を得るための重要な要素となる。端的に言えば、大きな σ_v は地形特徴の保存よりもスムージングを優先し、一方で小さな σ_h は、その優先度について地形の急峻さや複雑さに応じた制限を行う。DEM のランダムノイズを効率的に除去するためには、これらのトレードオフに係る上記パラメータについて適切な指標を得ることが必要となる。

4.2.3 パラメータの設定

画像の類似度に係るパラメータ σ_v については、地表面におけるオリジナルテクスチャの類似度に対して、画像に載っている標準的なノイズが適切にキャンセルされるように以下のモデルを定義する。

$$\sigma_v^2 = \sigma_s^2 + \sigma_o^2 \quad (4.7)$$

ここで、 σ_s は、センサの機器仕様に基づくノイズの標準偏差であり、 σ_o は、それ以外のラジオメトリック校正残差等による残留ノイズの標準偏差である。なお PRISM では、観測データを衛星から地上にダウンリンクする際に JPEG によるデータ圧縮を行っており、その圧縮に係り発生するノイズの存在が知られているが [Kamiya *et al.*, 2007]、 σ_o はこれらデータ転送等に係るノイズも含むものとして定義する。 σ_s 、 σ_o はそれぞれ以下により与えられる。

$$\sigma_s = \frac{\bar{s}_i}{SNR_s} \quad (4.8)$$

$$\sigma_o = \frac{\bar{s}_i}{SNR_o} \quad (4.9)$$

ここで、 SNR_s 、 SNR_o は各ノイズに該当する S/N であり、 \bar{s}_i は i を中心とした小領域における画素値平均として以下により与えられる。

$$\bar{s}_i = \frac{1}{n^2} \sum_{k \in \mathbf{n}_i} v(k) \quad (4.10)$$

ここで、 SNR_s について PRISM の場合はセンサ設計上の仕様値として 70 と規定されているが [Tadono *et al.*, 2009]、 SNR_o については基準となる情報が存在しないため、該当ノイズが存在しない場合 ($SNR_o = \infty$)、および SNR_s を基準とした 4 種類 ($SNR_o = SNR_s$, $SNR_s / 2$, $SNR_s / 3$, $SNR_s / 4$) の場合の計 5 種類について比較を行って最適な設定値を推定することとした。

DEM の高さの差に係るパラメータ σ_h については除去を行う標準的な高さ誤差に基づき設定する必要があるが、本研究では、サンプルとした PRISM の場合の精度仕様値に基づく $\sigma_{h0} = 5 \text{ m}$ を基準とした 3 種類 ($\sigma_h = \sigma_{h0}$, $2 \sigma_{h0}$, $3 \sigma_{h0}$) について比較を行い設定することとした。なお、仕様値である 5m は RMS による指標であるが、ここでは誤差分布の平均を 0 と仮定して標準偏差と同一とみなしている。

類似度を計測するベクトルサイズ $n \times n$ および加重平均を行うカーネルサイズ $N \times N$

については、DEM 作成に用いたステレオマッチングの NCC のテンプレートサイズに従い定めるのが適切であると考えられる。PRISM の DEM 作成に用いている NCC テンプレートは第 2 章に述べたとおり可変のサイズを採用しており、最小値が 9×9 、最大値が 29×29 となっている [Takaku *et al.*, 2009a]。ここで、単一画像内でのパターンの類似度を計測するベクトルサイズ $n \times n$ は少なくともステレオ画像間の類似度を計測した NCC の最小テンプレートサイズ 9×9 よりも空間的な感度が高いことが望ましいことからその約 $1/2$ となる 5×5 とした。また、カーネルサイズ $N \times N$ については、水田等フィルタが必要なエリアで主に用いられる NCC の最大テンプレートサイズ 29×29 に対してより多くの情報を加重平均に使用することが望ましいことから、経験的に 51×51 とした。

パラメータ σ_v , σ_h の決定および定量評価を行うに当たっては、サンプルとして第 2 章に示している筑波山麓を撮影した PRISM 画像から作成された DEM データと航空機 LiDAR 計測による参照 DEM データを用いた。第 2 章の図 2-12 に示した地形特徴、テクスチャの異なる 8 エリアについて、まずは σ_v に対する比較評価として、5 種類の SNR_o 設定値に基づく σ_v によりフィルタ処理を行った。作成した DEM の参照 LiDAR DEM からの差の標準偏差について、フィルタ前のオリジナル DEM による差の標準偏差と併せた比較を図 4-5 に示す。なおここで、 σ_h の設定値については、異なる σ_v による DEM の精度比較に対してほぼ相関が無く独立であることが確認されたため、任意に $\sigma_h = 2\sigma_{h0}$ とした。

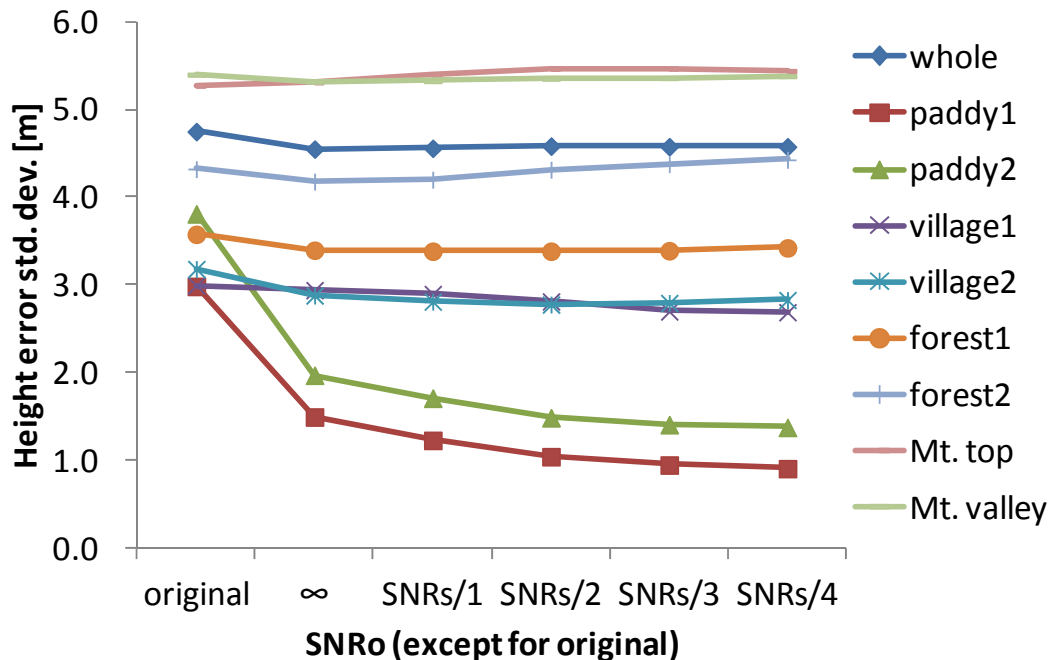


図 4-5 異なる SNR_o による PRISM DEM の LiDAR DEM からの差の標準偏差

図 4-5 によれば、水田域の Paddy1, Paddy2 においては、DEM の誤差がオリジナルデ

一タの 3~4 m から SNR_o の設定を小さくするに従い 1~2 m 程度にまで減少している、すなわちノイズ除去が行われていることが確認できる。平坦な地形に小規模な家屋等の人工構造物を含む Village1, Village2 でも同様の傾向がみられるが、誤差低減の程度は比較的小さい。一方、勾配を持つエリアである残りの Forest, Mountain については、 SNR_o の設定を小さくするに従い逆に誤差が僅かに大きくなる傾向を示している。これはすなわち σ_v の設定値が平坦地形におけるノイズ低減と急峻地形における地形特徴保存とのトレードオフになっているためであり、その最適な設定値は厳密に言えば DEM の応用分野に依存する。本研究では、主にノイズ低減が望まれる Paddy, Village について、図 4-5 によれば $SNR_o = SNR_s / 3$ でほぼリミットに達しており、 $SNR_o = SNR_s / 4$ では更なるノイズ低減が望めないとみられることから $SNR_o = SNR_s / 3$ を設定値とすることとした。

次いで、 σ_h に対する比較評価として、3 種類の設定値に基づきフィルタ処理を行った。作成した DEM の参照 LiDAR DEM からの差の標準偏差について、フィルタ前のオリジナル DEM による差の標準偏差と併せた比較を図 4-6 に示す。

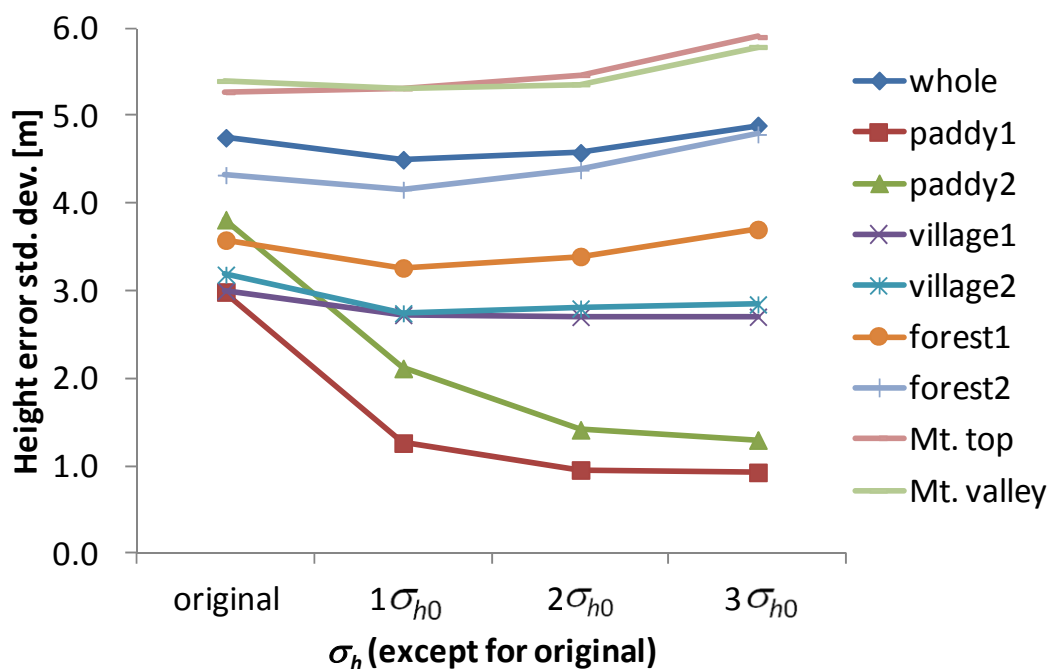


図 4-6 異なる σ_h による PRISM DEM の LiDAR DEM からの差の標準偏差

図 4-6 の傾向としては、 SNR_o について比較を行った図 4-5 に対して、 σ_h と SNR_o の大小関係を入れ替えた場合に類似した傾向となっている。但し、Forest, Mountain における誤差の増加量は、Paddy や Village における誤差の低減量に対して比較的大きくなっていることが判る。これは、 σ_h の設定が特に急峻地形において敏感であり、大きな設定値によりオリジナル地形が比較的簡単にスムージングされ、本来の地形特徴を失ってしま

っていることが考えられる。 σ_h の最適値も SNR_o と同様にその用途に依存するが、本研究では、Paddyにおいてほぼノイズ低減のリミットに達していると思われる $\sigma_h = 2\sigma_{h0}$ を設定値とした。

4.2.4 精度評価

前節で定めたパラメータ設定値を用いてPRISMから作成したDEMのフィルタ処理を行い、航空機LiDARによる参照DEMとの比較を行った。第2章の図2-12に示した地形特徴、テクスチャの異なる8エリアを中心とした各2km x 2kmについて、PRISM直下視画像と、作成オリジナルDEM、フィルタ済みDEM、参照DEMのそれぞれ陰影図(Shaded Relief)の比較を図4-7～図4-14に示す。また第2章に挙げた方式に沿って評価した参照DEMからの高さの差の統計値について、フィルタ前後の比較を行った結果を表4-1に示す。

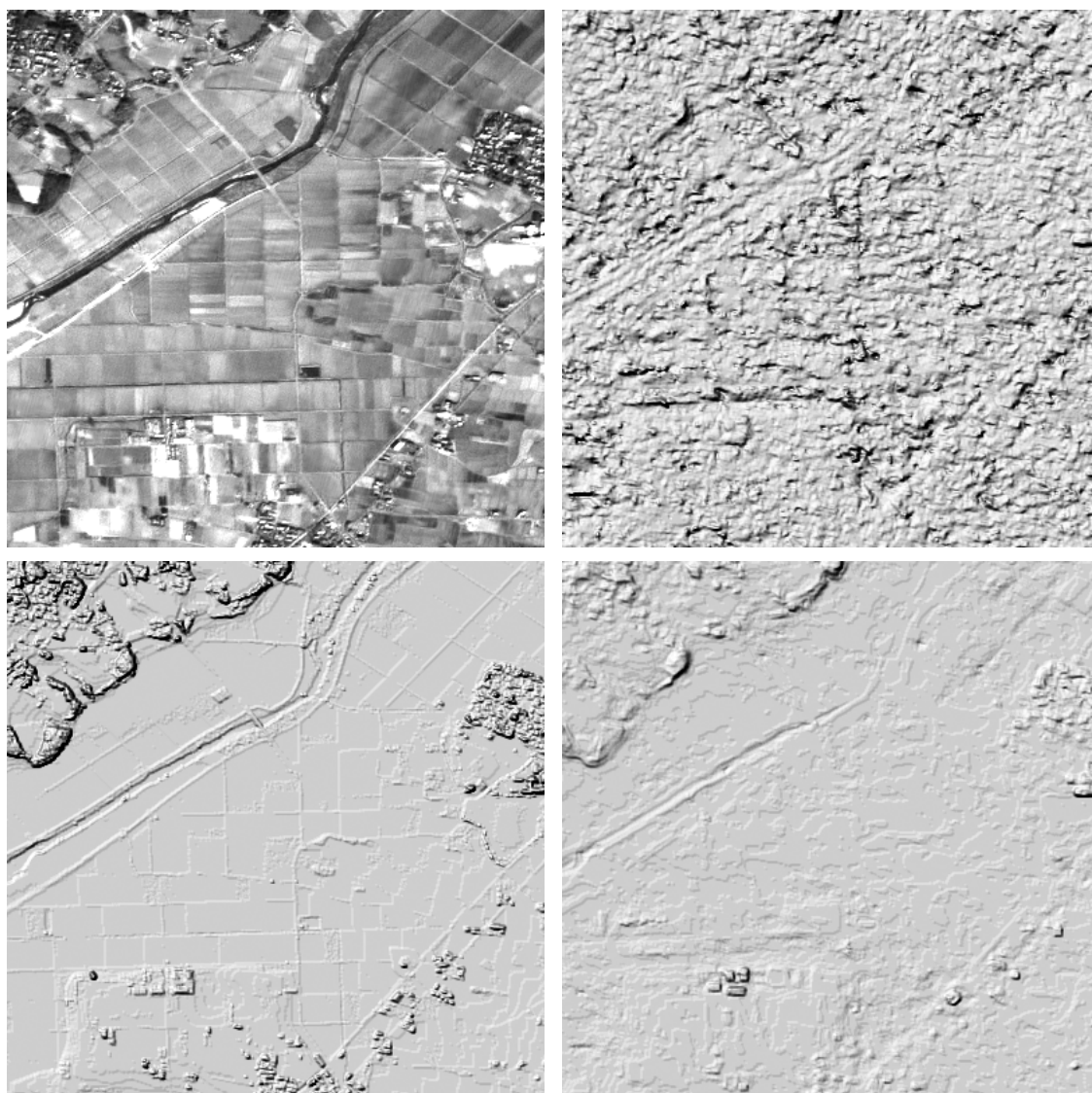


図 4-7 DEM 評価エリアにおける画像比較 - Paddy1 (2 km x 2 km)
上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM
下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM
DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

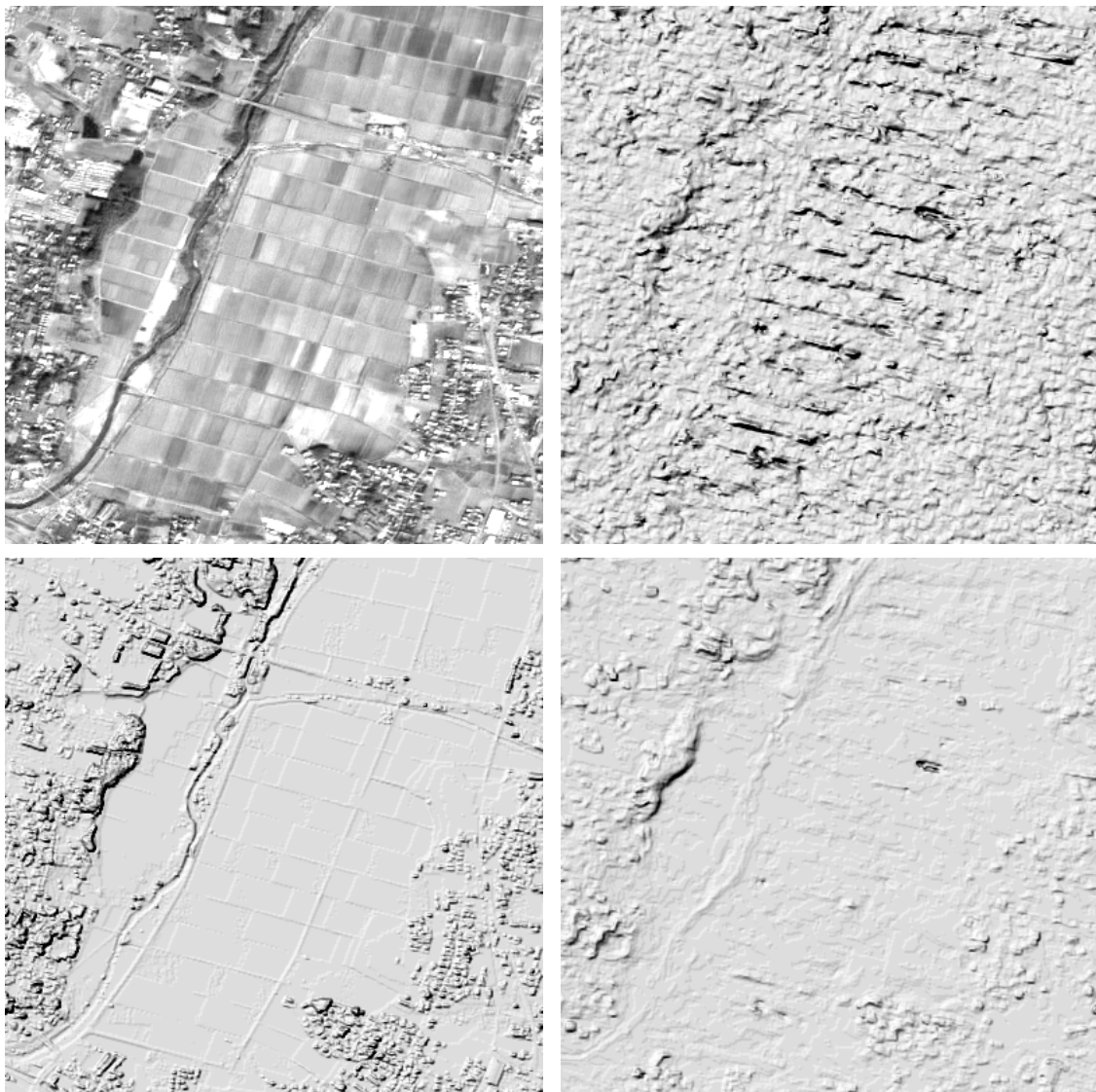


図 4-8 DEM 評価エリアにおける画像比較 - Paddy2 (2 km x 2 km)

上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM

下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM

DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

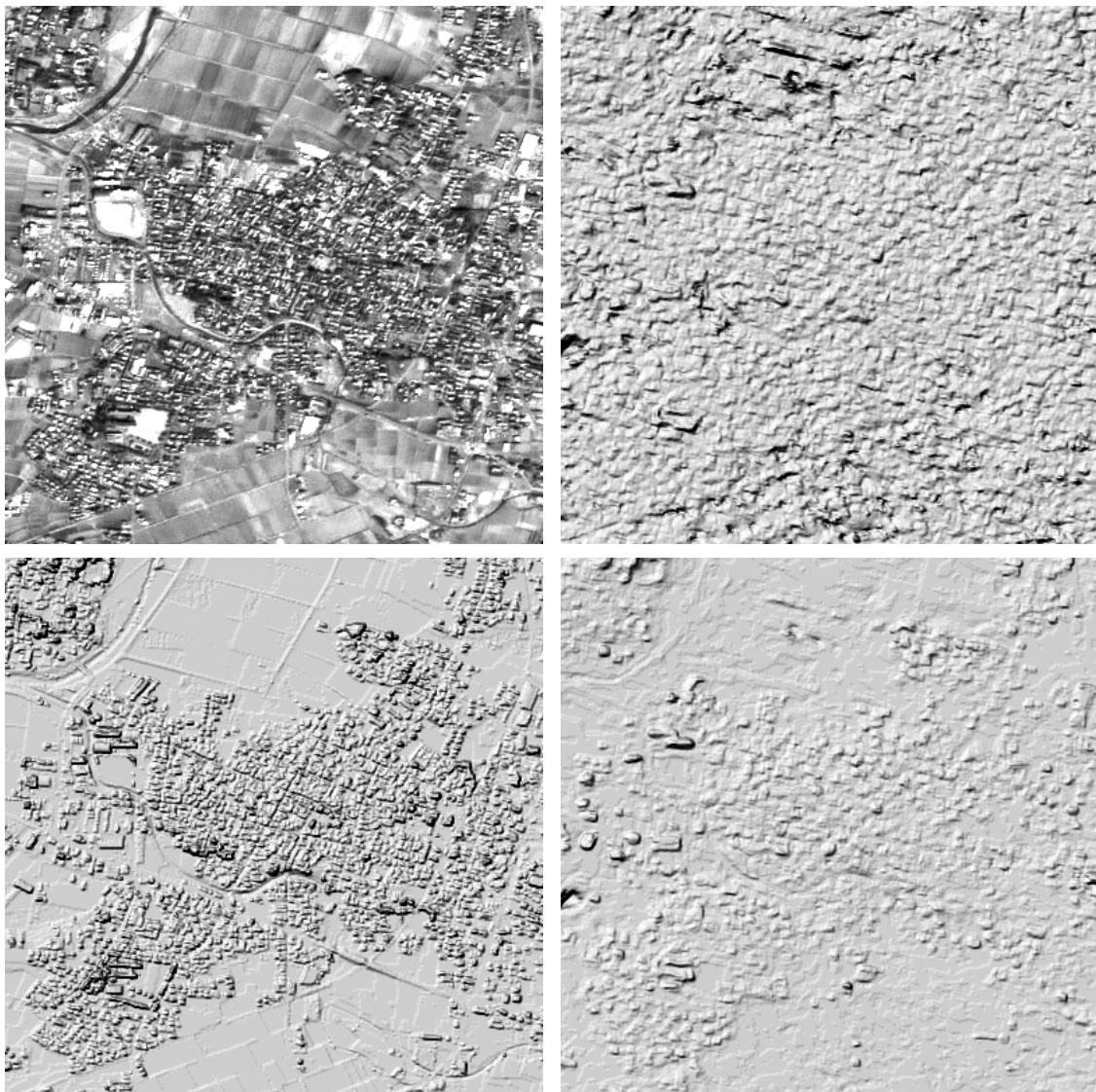


図 4-9 DEM 評価エリアにおける画像比較 — Village1 (2 km x 2 km)
上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM
下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM
DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

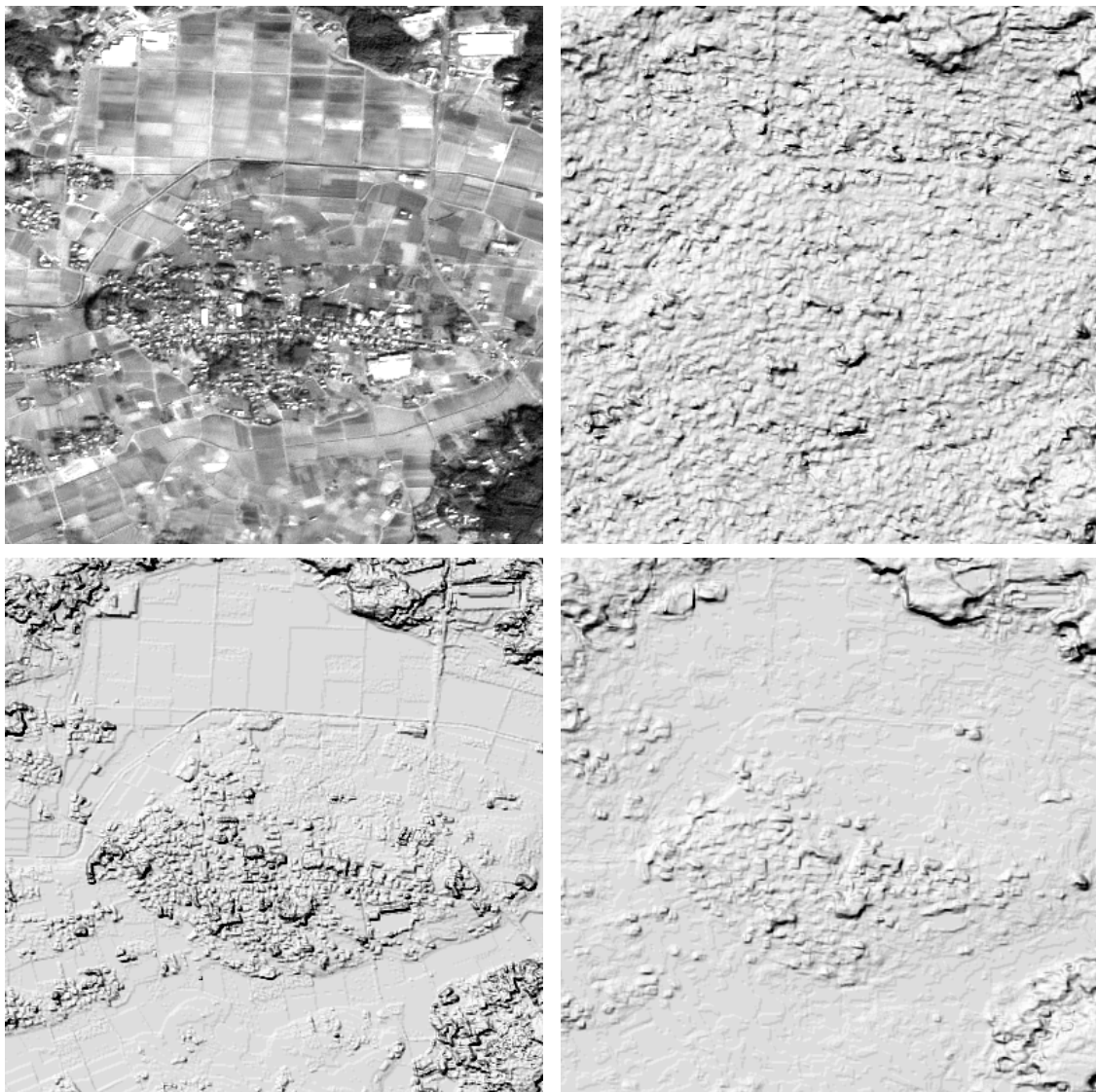


図 4-10 DEM 評価エリアにおける画像比較 — Village2 (2 km x 2 km)

上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM

下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM

DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

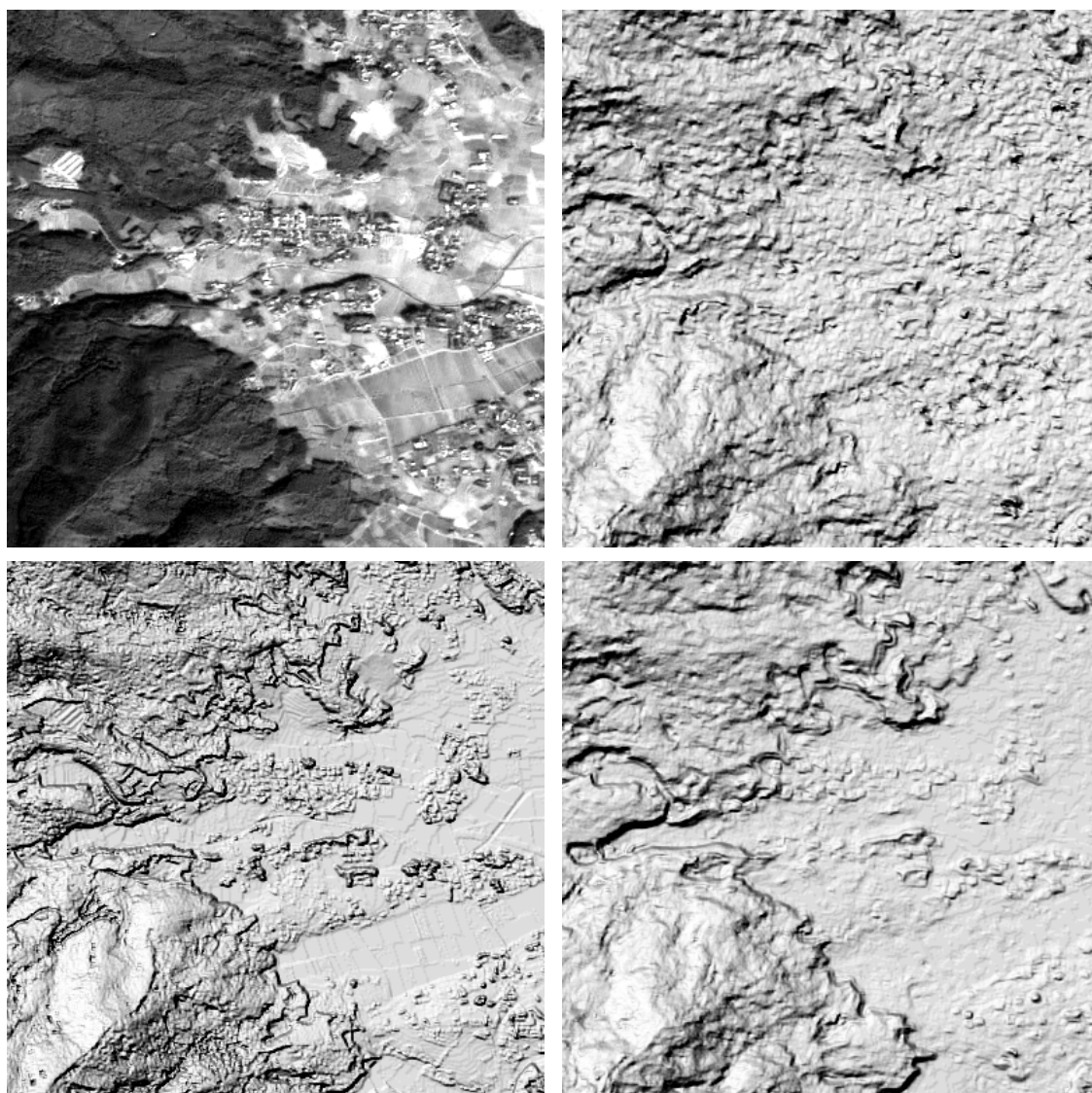


図 4-11 DEM 評価エリアにおける画像比較 — Forest1 (2 km x 2 km)

上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM

下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM

DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

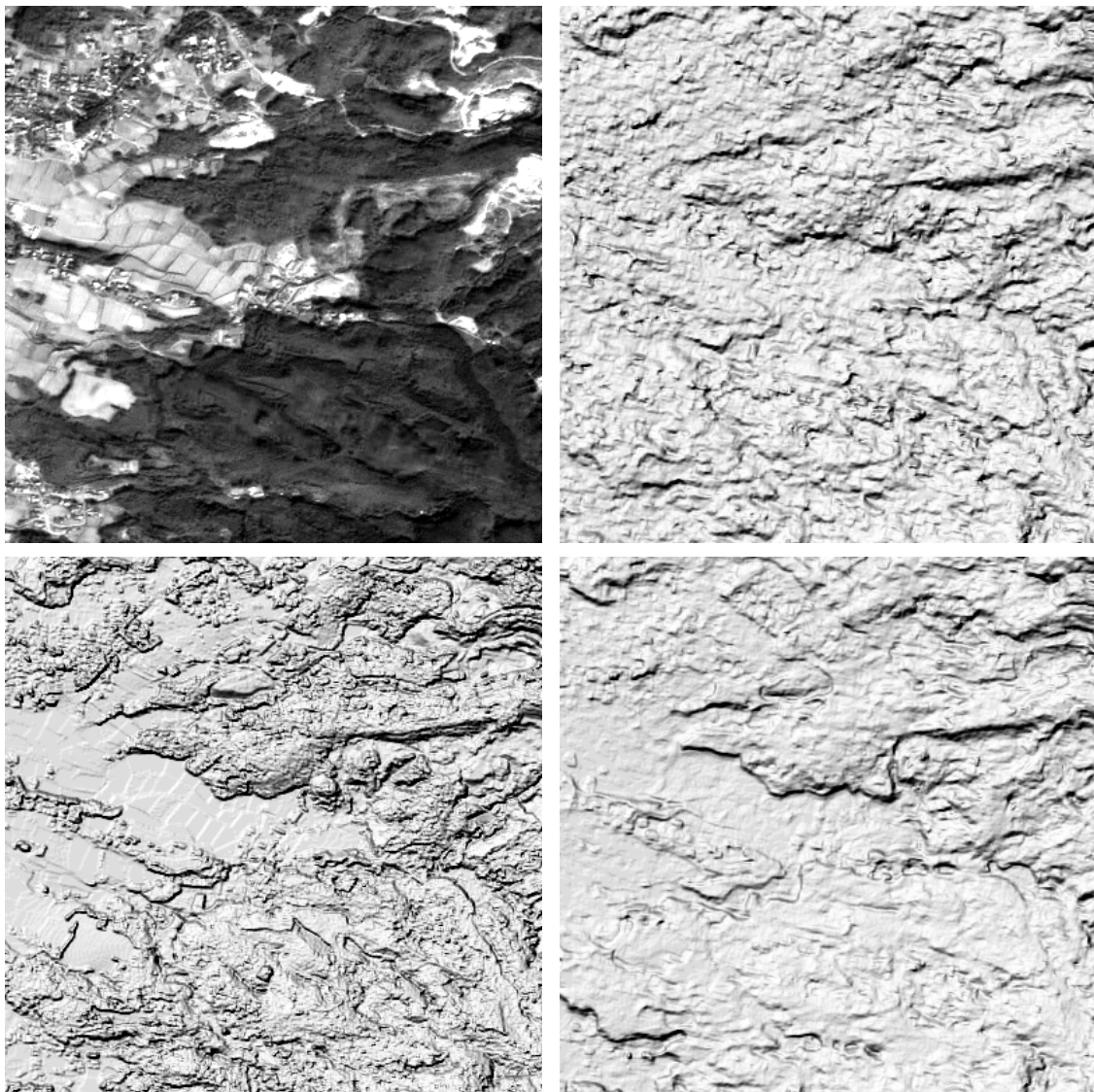


図 4-12 DEM 評価エリアにおける画像比較 — Forest2 (2 km x 2 km)

上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM

下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM

DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

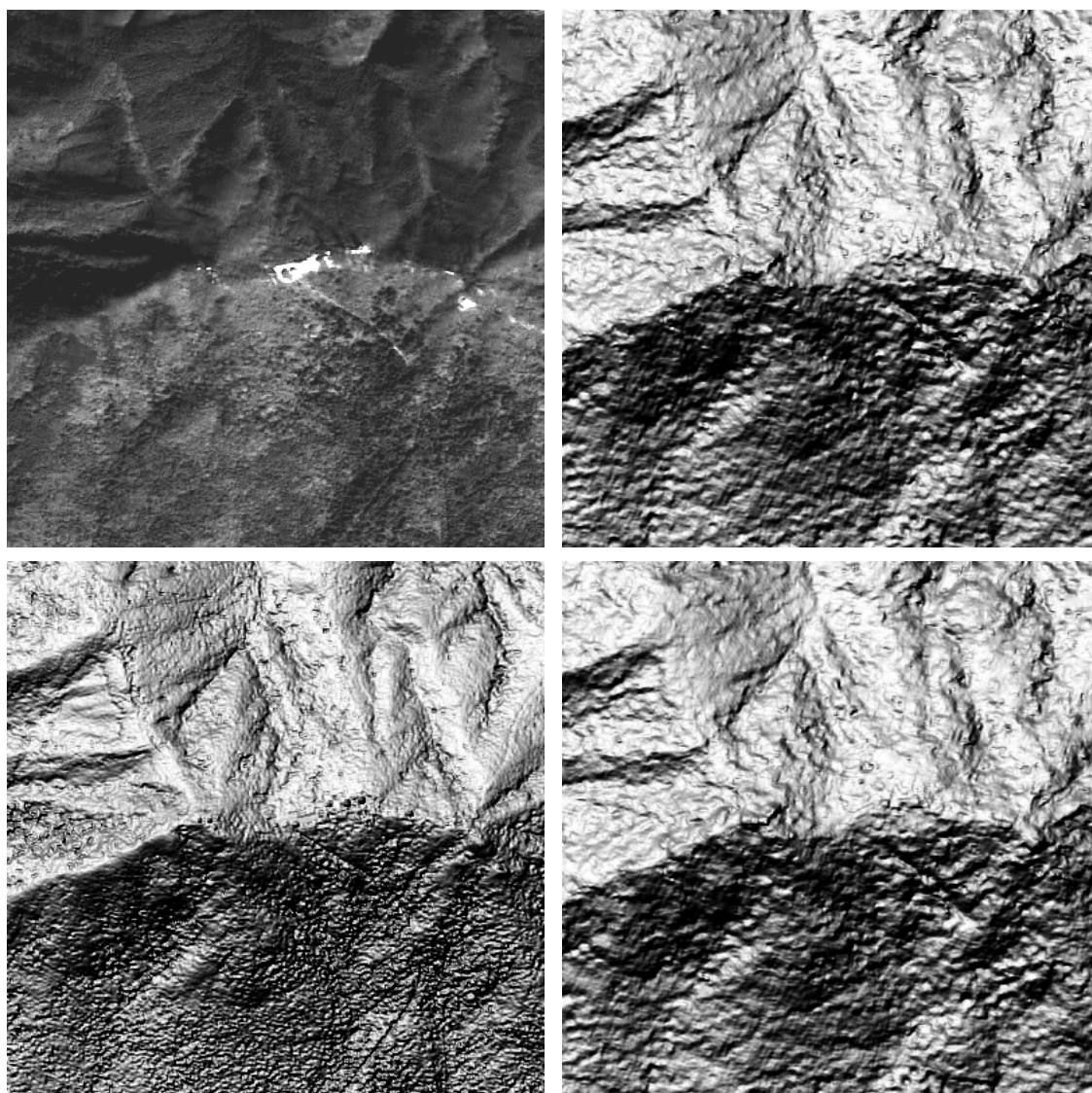


図 4-13 DEM 評価エリアにおける画像比較 — Mountain-top (2 km x 2 km)
上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM
下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM
DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

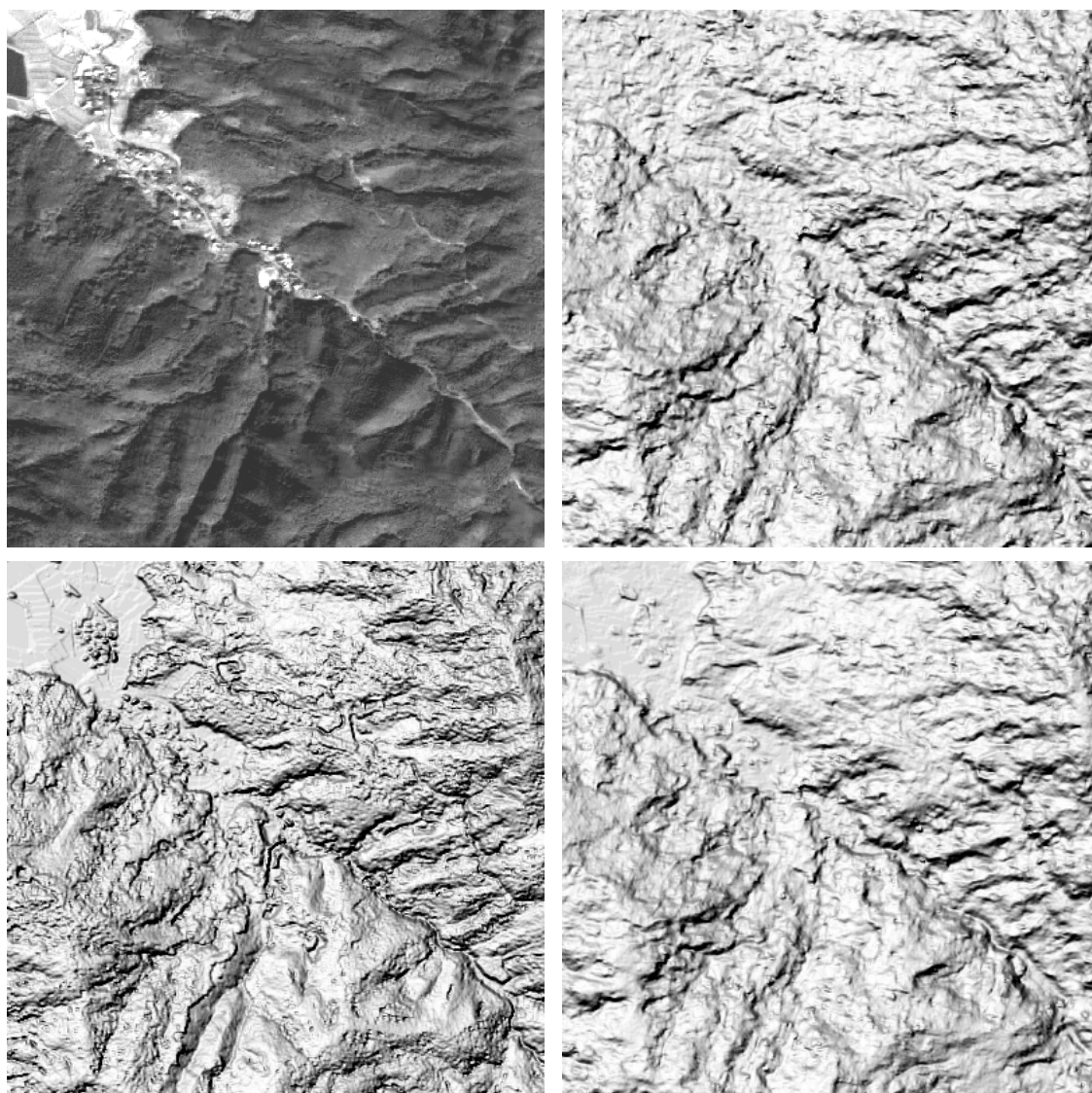


図 4-14 DEM 評価エリアにおける画像比較 - Mountain-valley (2 km x 2 km)
上左：直下視画像，上右：オリジナル DEM
下左：参照 DEM，下右：フィルタ済み DEM
DEM は陰影図 (Shaded Relief) による表示

表 4-1 参照 DEM からの高さの差の統計値—フィルタ前(Pre-)後(Post-)の比較

Terrain	Filter	Bias	SD	RMSE	Max	Min
Whole	Pre-	-1.16	4.75	4.89	38	-110
	Post-	-1.10	4.58	4.71	35	-113
Paddy1	Pre-	0.07	2.99	2.99	18	-20
	Post-	-0.02	0.96	0.96	4	-7
Paddy2	Pre-	0.52	3.81	3.85	26	-31
	Post-	0.55	1.41	1.52	9	-19
Village1	Pre-	0.25	3.00	3.01	15	-21
	Post-	-0.01	2.70	2.70	9	-21
Village2	Pre-	-0.16	3.19	3.19	16	-22
	Post-	-0.48	2.80	2.84	12	-21
Forest1	Pre-	-0.70	3.58	3.65	19	-24
	Post-	-0.51	3.39	3.43	21	-22
Forest2	Pre-	-0.52	4.32	4.35	18	-30
	Post-	0.00	4.38	4.38	21	-24
Mountain top	Pre-	-1.51	5.27	5.48	31	-38
	Post-	-1.75	5.47	5.74	32	-46
Mountain valley	Pre-	-2.37	5.40	5.89	21	-32
	Post-	-1.64	5.36	5.60	22	-29

図 4-7 ~ 図 4-14 によれば、スタックを行っていない単一シーンによる DEM は、特に水田などの平坦域において、多くのランダムノイズを含んでいる様子が伺える。これらはステレオ画像のテクスチャ不足に伴うマッチング誤差から由来していると考えられるが、ノンローカルフィルタを応用した提案手法を用いることで、オリジナルの地形情報を保存しながらノイズのみを劇的に低減している様子が視覚的に確認できる。図 4-7 の Paddy1 では、フィルタ後の DEM においてエリアを斜めに横切る小川に沿った地形がよりはっきりと確認できる。表 4-1 によると、Paddy1 では、フィルタ前のオリジナル DEM による DEM 誤差の標準偏差が 2.99 m であるのに対しフィルタ後では 0.96 m と約 1/3 に低減されており定量的にもその効果が確認された。また、Paddy2 においてもその傾向はほぼ同様である。図 4-9, 図 4-10 の Village1, Village2 では、住宅密集地における人工構造物の形状を保存しつつ、その合間を占める平坦域のノイズ成分を低減できている。表 4-1 では、これらを反映した結果として、DEM 誤差の標準偏差がそれぞれ 3.00 m から 2.70 m, および 3.19 m から 2.80 m に向上している。図 4-11, 図 4-12 の Forest1, Forest2 については、Village と同様に森林の合間を埋める平坦域のノイズが低減され、またその効果により森林域と非森林域との境界がより正確に再現されるようになっている様子が伺える。但し、表 4-1 における同エリアの誤差統計値としては、フィルタ前後で

ほぼ変わらない結果となっている。これはフィルタ処理による平坦地のノイズ低減と、森林樹冠高の精度低下とのトレードオフによるものと思われるが、第2章の最後に述べたとおり樹冠高の誤差については光学ステレオと LiDAR との計測方式の違い自体に由来するシステムノイズが含まれている可能性も考えられる。残りの Mountain の2エリアについては、特に図 4-13 における Mountain-top についてフィルタ前後でほとんど変化が無いように見える。これは、式 4.5 の w_h により、急峻地形での加重平均の重みが制限されている効果と考えられる。参照 DEM からの DEM 誤差の標準偏差はフィルタによって 5.27 m から 5.47 m に僅かに増加しているが、元々の誤差の絶対量に対する割合としては増加の幅は比較的小さい。Mountain-valley については、谷間に僅かに存在する平坦地のノイズ低減効果により、DEM 誤差の標準偏差は非常に僅かではあるが向上している。

図 4-15 に平坦域におけるフィルタ前後の DEM および参照 DEM の高さプロファイルの比較について示す。図 4-15 からは、フィルタ前後の DEM について、プロファイル中央部に位置する鋭いエッジを有した構造物の特徴を保存しつつ、効果的にランダムノイズを低減している様子が確認できる。

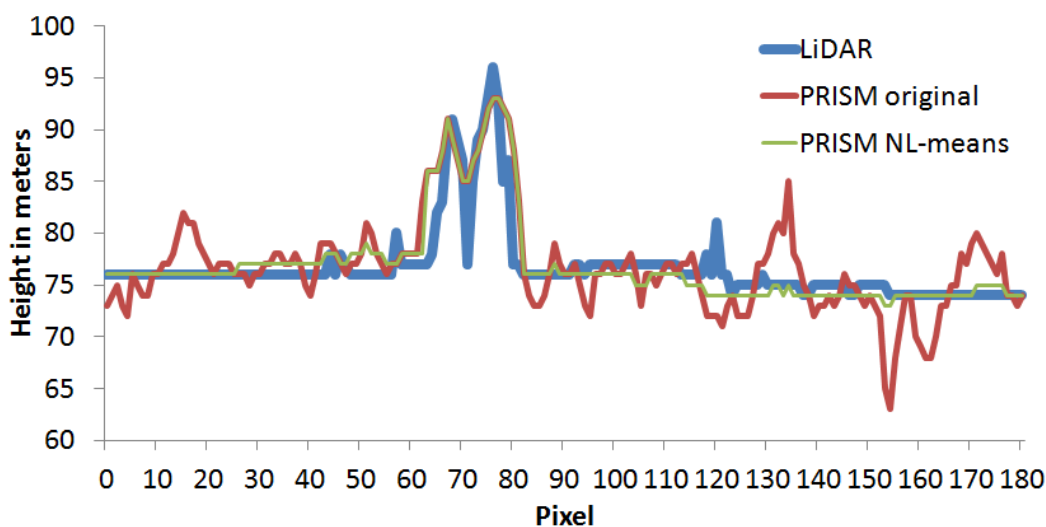


図 4-15 平坦域におけるフィルタ前後の DEM および参照 DEM の高さプロファイルの比較

但し、図 4-8 の Paddy2 の水田における中央やや左に残っている穴のように、ピットやスパイク状の大きなノイズが稀に残留しているエリアも観測された。これは、式 4.5 による高さの差にかかる重みがノイズの程度によっては有効に働いていない場合があることが考えられるが、その対策については次節に述べる。

4.2.5 高さの局所分散の適用

前節の評価結果からは、平坦地に発生しているランダムノイズについて、稀にピットやスパイク状の大きなノイズが残留する可能性があることが確認されたが、これは、式 4.5 による高さの差に応じてフィルタ強度を抑制するための重みが、平坦域で発生している比較的大きなノイズに対しても過剰に効いてしまうことが原因と考えられる。よって、これら対象画素近傍の高さの差に係る重みについて、局所内での地形の急峻さに係るより統計的な性質を反映するものとして、 $N \times N$ 内における高さの分散を重みとして使用する手法を検討した。すなわち、式 4.4 の w_v に対して、

$$w_{vd}(i, j) = \exp\left(-\frac{\|v(\mathbf{n}_i) - v(\mathbf{n}_j)\|_2^2}{2\sigma_v^2 n^2} \cdot \sigma_d^2(i)\right) \quad (4.11)$$

とした。ここで、 $\sigma_d^2(i)$ は、対象画像アドレス i を中心とした $N \times N$ 内における DEM の高さの分散であり、以下により算出される。

$$\sigma_d^2(i) = \frac{1}{N^2} \sum_{j \in N_i} (h(j) - \bar{h}(i))^2 \quad (4.12)$$

$$\bar{h}(i) = \frac{1}{N^2} \sum_{j \in N_i} h(j) \quad (4.13)$$

ここで、この分散は局所的なノイズ以外のオリジナル地形における急峻地にのみ感度があるようにしておく必要があるため、その算出に使用する DEM については、前処理として $N \times N$ カーネルによるメディアンフィルタを適用した。図 4-16 に山岳域における PRISM による DEM に対して算出した $N \times N$ 分散の平方根（標準偏差）の分布を示す。

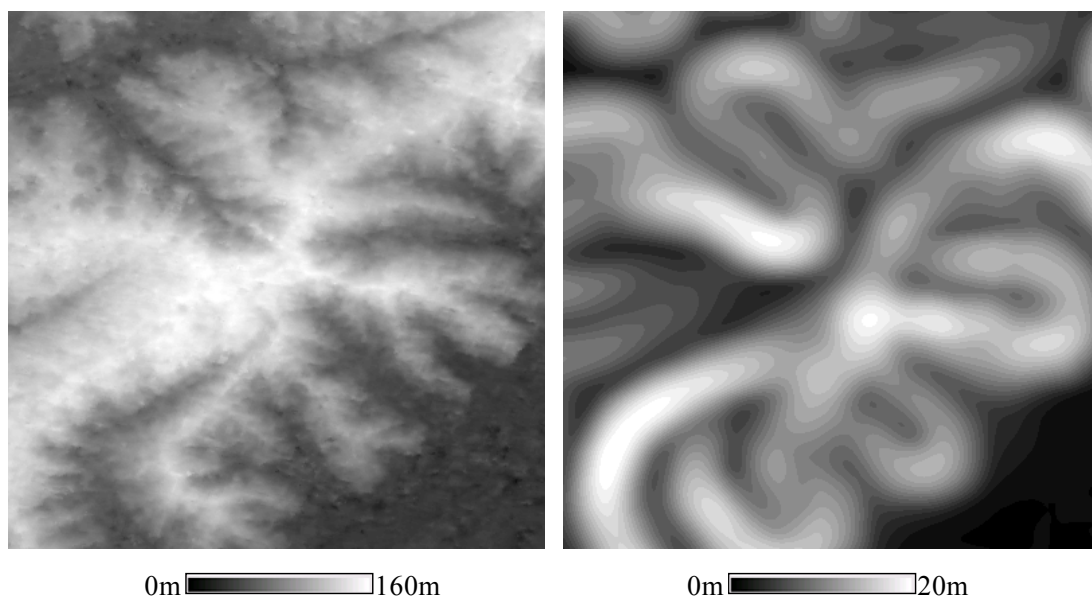


図 4-16 PRISM DEM の高さ標準偏差の分布例 (2 km x 2 km)
左：オリジナル DEM, 右：標準偏差分布

最終的なノンローカルフィルタを定義する式 4.1 における w は改めて以下により置き換えられる。

$$w(i, j) = w_{vd}(i, j) \quad (4.14)$$

本フィルタを前節同様の DEM データに適用した結果について、図 2-12 の 8 エリアにおける結果の陰影図 (Shaded Relief) を図 4-17, 図 4-18 に示す。8 エリアにおける参照 DEM との比較結果の統計値について表 4-2 に示す。

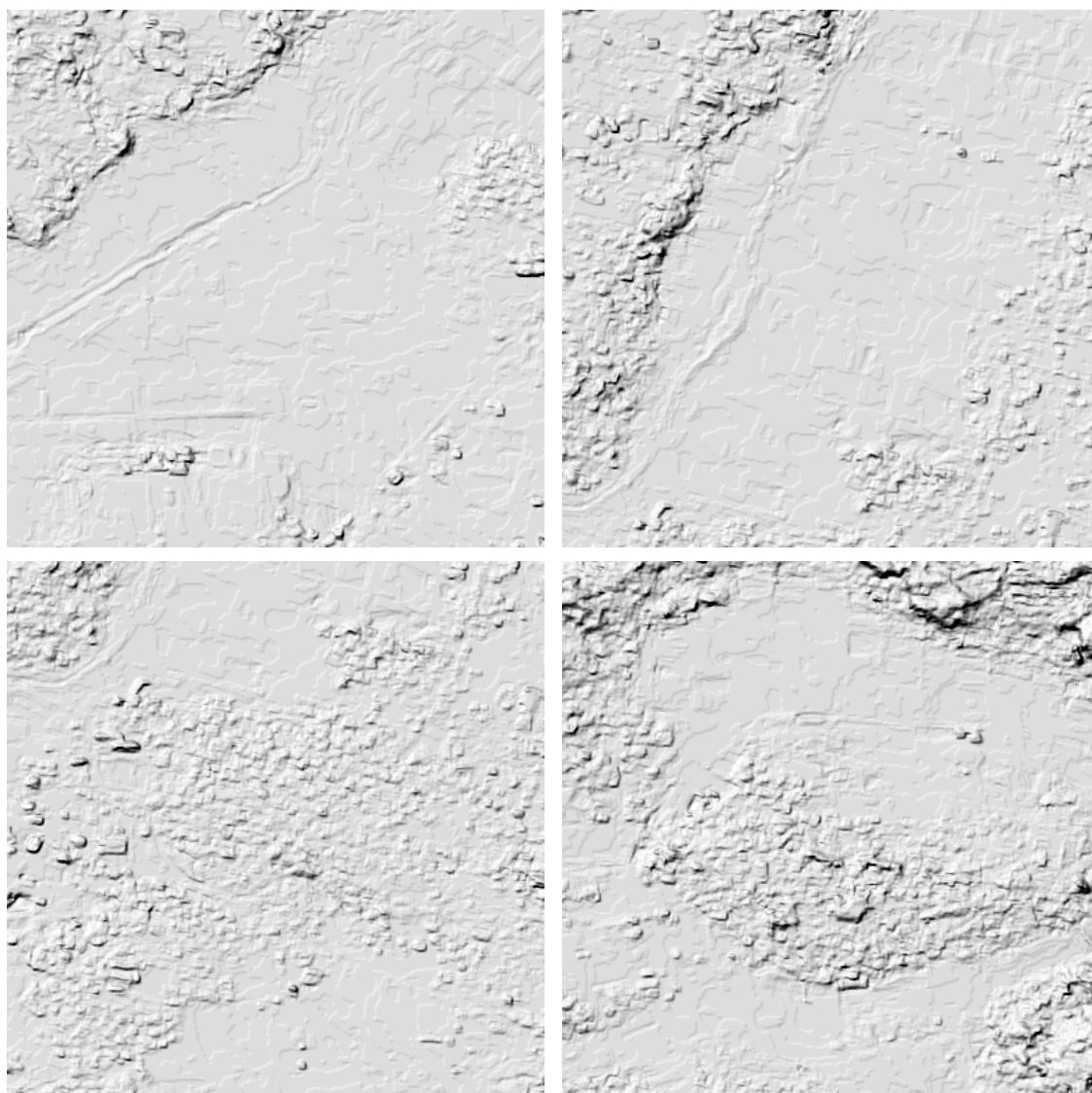


図 4-17 高さ局所分散を重みとしたノンローカルフィルタによる DEM 陰影図
(Shaded Relief)

上左 : Paddy1, 上右 : Paddy2
下左 : Village1, 下右 : Village2

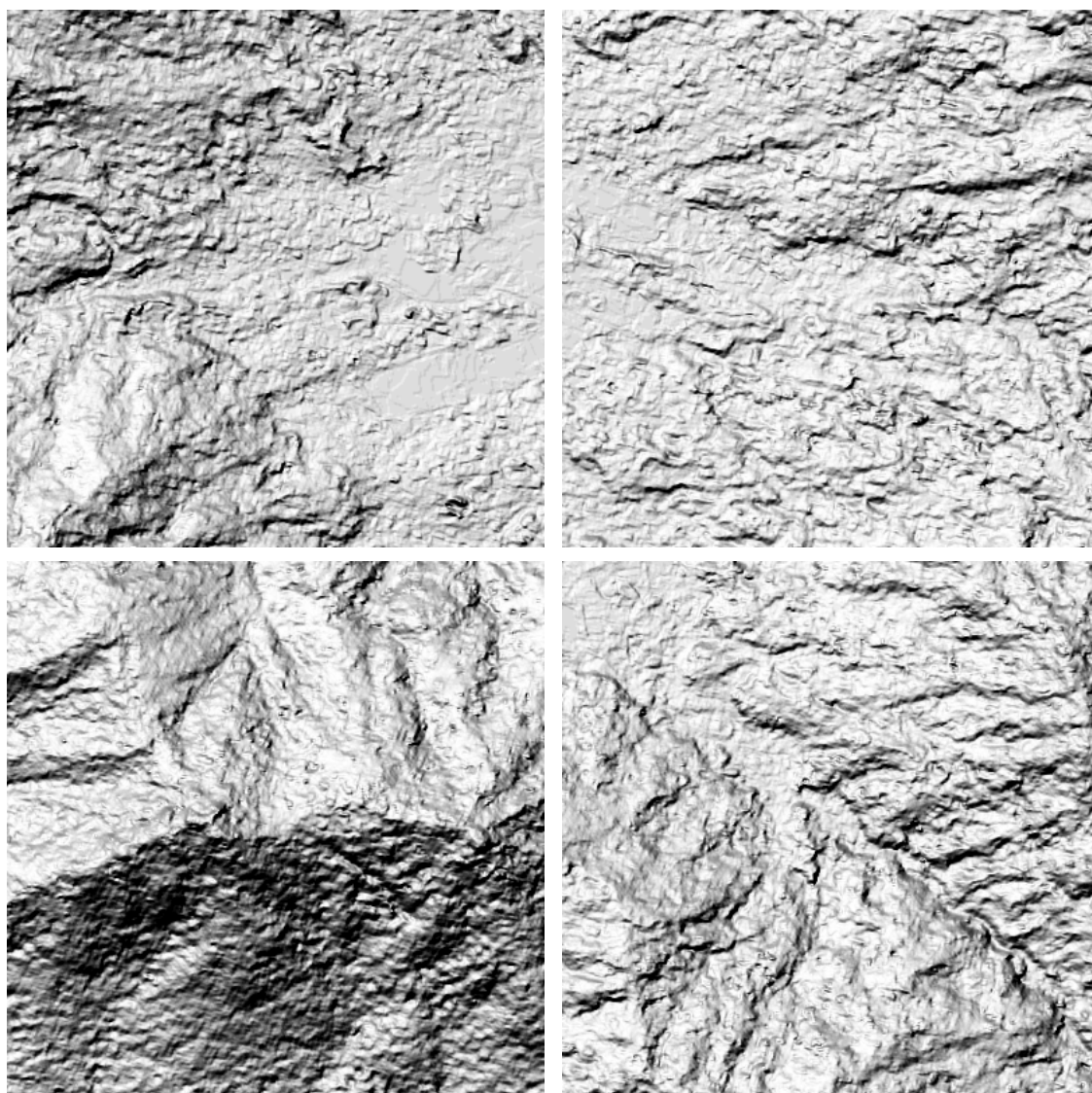


図 4-18 高さ局所分散を重みとしたノンローカルフィルタによる DEM 陰影図
(Shaded Relief)

上左 : Forest1, 上右 : Forest2

下左 : Mountain-top, 下右 : Mountain-valley

表 4-2 ノンローカルフィルタ（高さ局所分散適用）による PRISM DEM と LiDAR DEM の高さの差の統計値（単位:m）

Area	Points	Ave.	S.D.	RMS	Max.	Min.
Whole	5155801	-1.13	4.60	4.73	35	-111
Paddy1	40000	-0.03	0.92	0.92	4	-7
Paddy2	40000	0.50	1.28	1.37	9	-10
Village1	40000	0.05	2.74	2.74	11	-21
Village2	40000	-0.22	2.84	2.85	14	-21
Forest1	40000	-0.71	3.39	3.46	19	-24
Forest2	40000	-0.53	4.28	4.31	18	-30
Mountain top	40000	-1.51	5.27	5.48	31	-38
Mountain valley	40000	-2.37	5.40	5.89	21	-32

図 4-17 の Paddy2 の陰影図 (Shaded Relief) によれば、図 4-8 の同エリアにおいて残留していたピット状のノイズは適切に除去されており、それ以外のエリアについてもオリジナルの詳細な地形形状を保存しつつ、より効果的に平坦域をスムージングできていることが確認できる。これら傾向は表 4-2 の定量評価にも反映され、Paddy1, Paddy2 ではそれぞれ前節の高さの差をそのまま重みとする方式での DEM 誤差の標準偏差が、0.96 m, 1.41 m であったのに対し、本節の高さの局所分散を重みとする方式では、0.92 m, 1.28 m に向上している。一方で、図 4-17, 図 4-18 図によれば、他のエリアについては両者の傾向はほぼ同等であるが、本節の方式では、例えば森林と裸地の境界や山裾の谷間など急峻地形と平坦地形の変わり目でのフィルタ効果が、前節の方式に対して劣っている箇所も見られた。これらの効果は表 4-2 における Village1, Village2 や Mountain-valley における僅かな標準偏差の低下に現れている。すなわち、本節による方式と前節による方式は、平坦域でのピット或いはスパイク状の比較的大きなランダムノイズの除去と、地形の変わり目における比較的小きなランダムノイズの除去とのトレードオフになっており、対象とする DEM の地域特性などに併せて適切に選択していくことが必要と思われる。

4.3 他のフィルタ手法との比較

DEM のランダムノイズを除去するフィルタについて、ノンローカルフィルタによる提案手法に以下の3手法を加えた計4手法による比較を行う。なおこれら比較のためのノンローカルフィルタとしては、高さの局所分散を用いない式 4.6 による方法を選択した。

移動平均 (Boxcar) フィルタ

移動平均フィルタは、カーネル畳み込みによる平滑化フィルタの中で最もシンプルかつ一般的なものであり、フィルタ対象画素を中心とした $N \times N$ 矩形カーネル内の全画素値の平均をフィルタ出力値とするものである。本フィルタは、カーネルサイズに沿った空間解像度の低下という根本的な制約があることが広く知られているが、本比較検証の中では参考として使用する。

シグマ (Lee-sigma) フィルタ

シグマフィルタは、移動平均同様のシンプルな矩形カーネルによる平滑化フィルタでありながら、誤差の正規分布の概念を基に空間解像度の保存を行う適応的フィルタの一つである [Lee, 1983]。本フィルタでは、フィルタ対象画素を中心とした $N \times N$ 矩形カーネル内の画素値について、 $[\mu_L - 2\sigma_L, \mu_L + 2\sigma_L]$ の範囲の値のみによる平均値をフィルタ出力値とするものである。ここで、 μ_L は、フィルタ対象画素の画素値自身であり、近隣画素の画素値の分布における理想的な平均値と仮定される。また σ_L は、カーネル内画素値の標準偏差である。

ジョイントバイラテラル (Joint Bilateral) フィルタ

ジョイントバイラテラルフィルタは、前出のコンピュータビジョン分野で提案されている手法を DEM に適用したものであり、ノンローカルフィルタにおいて考慮した式 4.1 について、重みを以下のように定義する。

$$w(i, j) = w_s(i, j)w_p(i, j)w_h(i, j) \quad (4.15)$$

ここで、 w_s および w_p はそれぞれ画素値の空間的および強度的な重みであり、 w_h はノンローカルフィルタにおける高さ誤差の重みによる式 4.5 と同様である。 w_s および w_p は以下のように定義する。

$$w_s(i, j) = \exp\left(-\frac{\|i - j\|^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (4.16)$$

$$w_p(i, j) = \exp\left(-\frac{\|v(i) - v(j)\|^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (4.17)$$

ここで、 σ_s 、 σ_p はそれぞれの重みの寄与度を制御するガウシアン標準偏差である。すなわち、ジョイントバイラテラルフィルタの概念はノンローカルフィルタと類似しているが、違いとしては、画素の類似度を測る指標としてジョイントバイラテラルは画素値自身の距離（差）を用いるのに対しノンローカルではベクトル（局所パターン）間の距離を用いていること、また、ジョイントバイラテラルのみ空間的な重みが考慮されていることが挙げられる。

移動平均、シグマフィルタについては、カーネルサイズ $N \times N = 5 \times 5, 17 \times 17, 51 \times 51$ として PRISM から作成した DEM に適用した。図 2-12 の Paddy1 におけるこれらフィルタ結果の陰影図（Shaded Relief）についてノンローカルフィルタによる結果と併せたものを図 4-19 に示す。また、ジョイントバイラテラルフィルタについては、 $N \times N$ および σ_p をノンローカルフィルタの場合と同様（ $N = 51, \sigma_p = \sigma_v$ ）とし、 σ_s は $2\sigma_s = (N + 1) / 2$ となるように設定した。図 2-12 の Village2 におけるフィルタ適用結果の比較について、図 4-20 に示す。

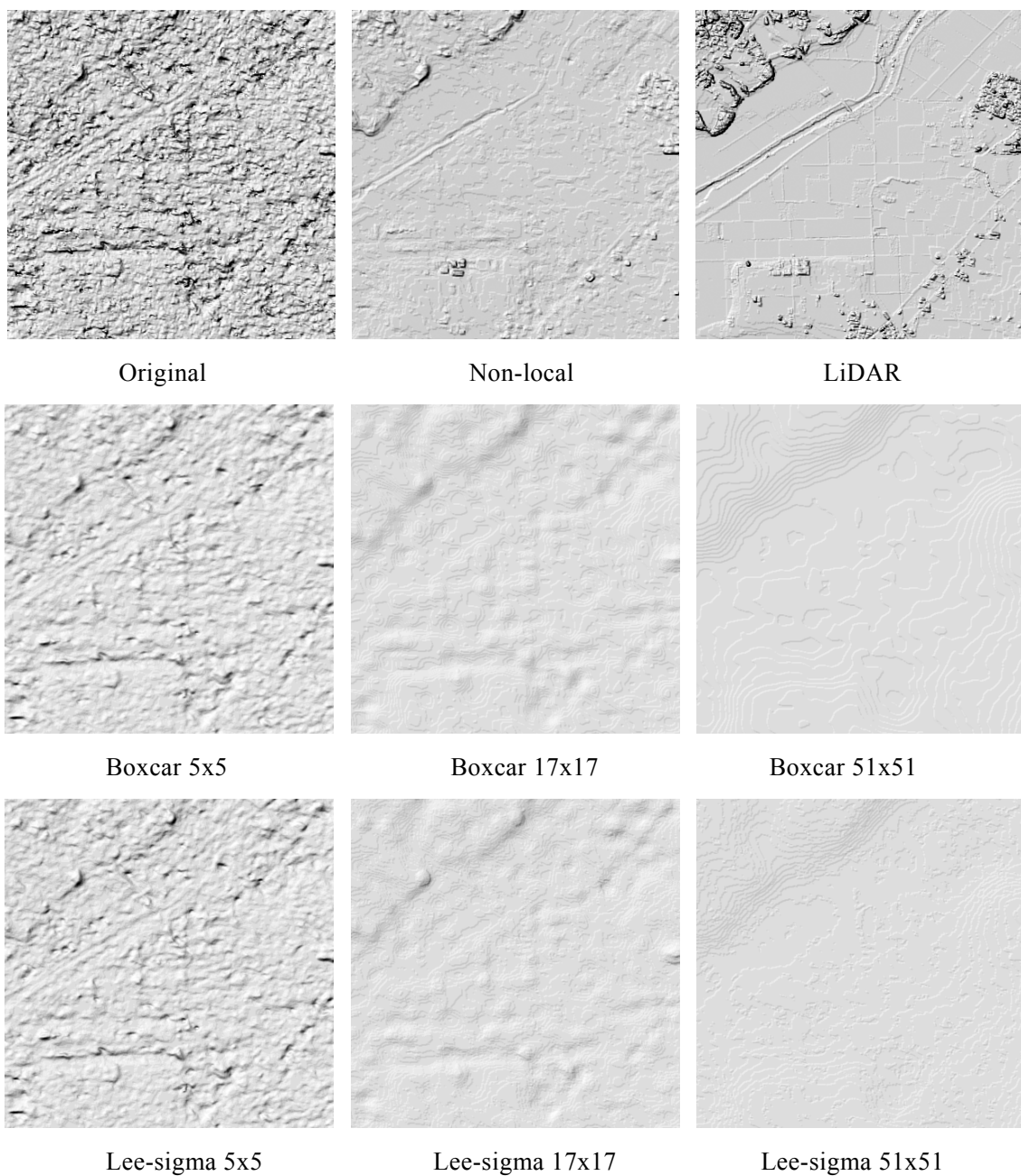
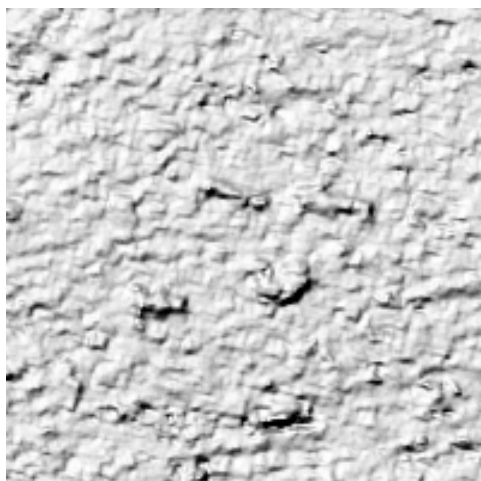


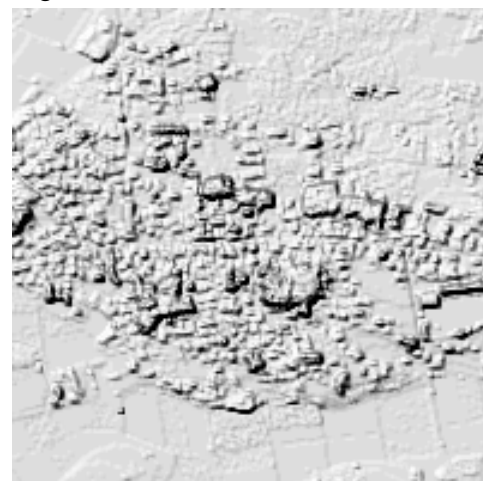
図 4-19 フィルタの違いによる DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較
— Paddy1 — (2 km x 2 km)



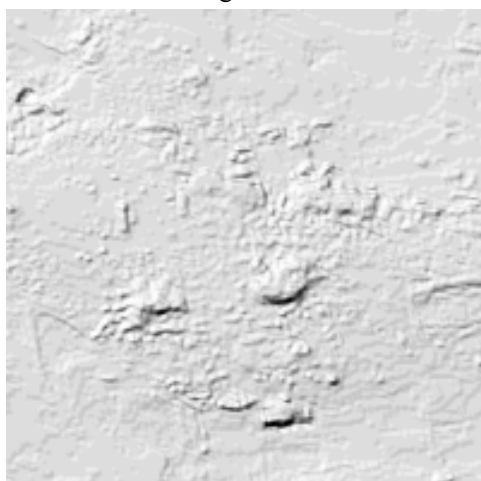
Nadir image



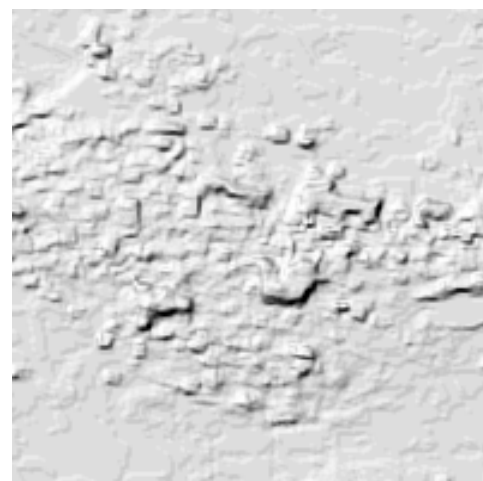
Original DEM



LiDAR DEM



Joint-bilateral DEM



Non-local DEM

図 4-20 フィルタの違いによる DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較
— Village2 — (1 km x 1 km)

図 4-19 によれば、移動平均やシグマフィルタによる DEM では、カーネルサイズが小さい場合にはノイズがほとんど除去できず、逆にカーネルサイズが大きい場合にはオリジナルの空間解像度や地形特徴を大きく失ってしまうというトレードオフが解消できていないことが明らかである。移動平均に比してシグマフィルタの方が解像度の保存性が高いようにもみえるが、その違いは非常に僅かなものとなっている。一方、ノンローカルフィルタによる提案手法ではこれらトレードオフをバランスよく満たしていることが改めて確認できる。

また、図 4-20 によれば、ジョイントバイラテラルフィルタについてはノンローカルフィルタと良く似た傾向を示している。ターゲットによってはむしろノンローカルフィルタよりも空間解像度が僅かに高い様子も伺える。但し、バイラテラルフィルタでは、住宅など人工構造物の詳細な特徴が除去されてしまっているエリアも確認できる。この理由としては、ノンローカルフィルタでは類似度の計測を局所パターン同士の距離で行っているのに対し、バイラテラルフィルタでは一つの画素の値のみの比較で行っているため、複雑なテクスチャを含む画像や地形では適切な類似度が計測できていないことが考えられる。

これら異なるフィルタ手法を適用した DEM の定量的な比較結果として、図 2-12 の Paddy1, Village2, Forest1, Mountain-valley の 4 エリアにおける参照 DEM からの誤差の統計値を表 4-3 に示す。なお、移動平均、シグマフィルタについては、 $N \times N = 17 \times 17$ の場合の結果を用いた。

表 4-3 参照 DEM からの高さの差の統計値－異なるフィルタによる比較

Area	Filter	Bias	SD	RMSE	Max	Min
Paddy1	Boxcar	0.06	1.42	1.42	5	-8
	Lee-sigma	0.07	1.41	1.41	5	-7
	Joint-bilateral	0.03	1.08	1.08	5	-7
	Non-local	-0.02	0.96	0.96	4	-7
Village2	Boxcar	-0.16	2.93	2.93	9	-22
	Lee-sigma	-0.23	2.90	2.91	10	-22
	Joint-bilateral	-0.23	2.99	3.00	10	-22
	Non-local	-0.48	2.80	2.84	12	-21
Forest1	Boxcar	-0.63	3.75	3.80	18	-25
	Lee-sigma	-0.71	3.60	3.67	19	-25
	Joint-bilateral	-0.53	3.47	3.51	18	-25
	Non-local	-0.51	3.39	3.43	21	-22
Mountain	Boxcar	-2.21	5.82	6.23	24	-24
Valley	Lee-sigma	-2.27	5.58	6.02	23	-25
	Joint-bilateral	-2.02	5.45	5.81	20	-29
	Non-local	-1.64	5.36	5.60	22	-29

表 4-3 によれば、ノンローカルフィルタとジョイントバイラテラルフィルタは、各エリアカテゴリーにおいてほぼ同等の精度を示しているが、例えば Paddy1 の標準偏差では、ノンローカルフィルタの 0.96 m に対してジョイントバイラテラルフィルタの 1.08 m といったように、ノンローカルフィルタの方が僅かに良い結果となっている。この理由としては、先に述べた加重平均の重みを与える類似度計測手法の違いに基づくものと捉えることができる。一方で、移動平均およびシグマフィルタでは、特に Paddy1 の標準偏差では共に約 1.4 m といったように、ほとんど全てのエリアカテゴリーで誤差が比較的大きくなっている。これらの画像特徴などを考慮しないシンプルなカーネルによるフィルタでは、先に述べたトレードオフが解消できずに、ノイズを除去しきれない且つオリジナルの地形特徴も失ってしまっているためである。

4.4 DEM 応用性の評価

フィルタによる DEM の応用性向上に係る定性評価の参考データとして、DEM の主要な応用分野の一つである洪水シミュレーション（流出解析）の簡易表現を行った画像を図 4-21 に示す。なお本参考データを作成する DEM に適用したノンローカルフィルタとしては、高さの局所分散を用いない式 4.6 による方法を選択した。図 4-21 では、洪水シミュレーションの重要性が高い比較的なだらかな地形（水田域）において、DEM の 1m 単位の標高を色分けして表示することで洪水時の浸水レベル毎の浸水域の分布を疑似的に簡易表現したものである。洪水の詳細なシミュレーションを行うためには精度の高い地形データを基に出水の流量や貯留量など多くの解析を行う必要があるが、フィルタ前の DEM ではノイズによりこれら詳細な解析を行うことが困難であることが明らかである [Fukami *et al.*, 2011]。一方、フィルタ後の DEM では、ノイズが大幅に軽減されたことにより LiDAR による高精度な DEM に近い精度および品質のデータとなっており、流出解析への適用性も大幅に高まっていることが予想される。これら効果に対する流出解析以外のものも含めた DEM 利用分野での評価は、本研究の今後の主要課題の一つである。

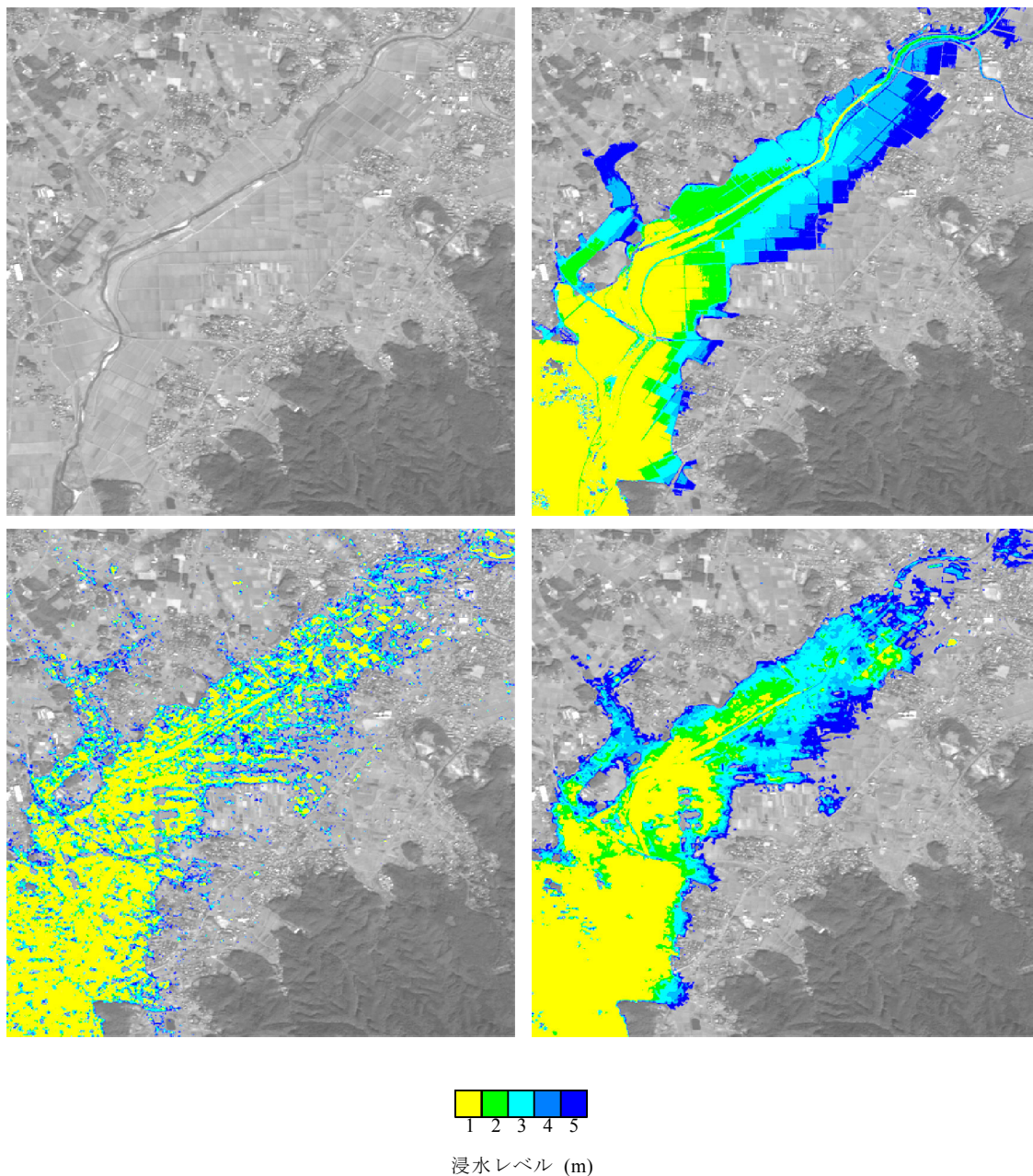


図 4-21 DEM による洪水シミュレーション模擬画像 (5 km x 5 km)
上左：直下視画像，上右：LiDAR DEM による浸水域
下左：オリジナル DEM による浸水域，下右：フィルタ済み DEM による浸水域

4.5 DEM ランダムノイズ低減手法のまとめ

衛星光学センサから作成した DEM においては、その作成過程の画像マッチングの精度限界に由来して画像解像度に沿ったランダムノイズが発生するが、これら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定義し、PRISM から作成した DEM をサンプルとして適用を行った。提案フィルタを適用した結果については、目視による検査のほか、参照 DEM を用いた定量評価を行ってその有効性を確認した。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。

本フィルタは、比較的シンプルなアルゴリズムであり、光学センサ由来のすべての DEM にほぼそのまま適用可能であることから汎用性は高いと考えられる。更に言えば DEM と対応した画像のセットがあれば例えそれが DEM の基となったステレオ画像でなくても適用可能である。

グローバル DEM データセットの整備では、本章の最初に述べたようにスタックによるノイズの低減も行われるが、このスタック済み DEM データと提案フィルタのパラメータ設定との相関については今後の調査課題である。また、本提案フィルタ方式は、その計算時間について比較的大きくなる傾向にあり、これに係るアルゴリズムの工夫なども今後の課題としたい。更に、本フィルタは、ある一定範囲における画像内特徴パターンの相互類似性に基づき DEM の平滑化を行うものであるが、画像内特徴と地形特徴との直接的な因果関係や、地形の連続・不連続性との関係などがモデル化できれば、それらを正則化項として与えることで、本フィルタの式 4.5 や式 4.11 で考慮したような DEM の特徴に基づく重みをより高度に制御できる可能性も考えられ、今後の検討課題としたい。

第5章 将来衛星適用性確認

5.1 将来衛星データシミュレーション

本章では、将来光学衛星 DEM 作成ミッションで作成されるより高解像度な DEM に対して、第 4 章で提案を行ったランダムノイズ低減手法の適用を行い、その有効性・汎用性および将来性について確認する。まず、サブメータ級の地上解像度を持つことが予想される将来の光学衛星におけるステレオ画像について、想定される解像度に応じたシミュレーションデータを作成する。次いで、それらからマッチング処理により DEM を作成し、第 4 章で提案を行ったノンローカルフィルタの適用を行ってノイズ低減効果の確認を行う。

シミュレーションデータの解像度としては、日本の ALOS による光学センサミッションの後継に当たる光学衛星にて想定されている 0.8 m を想定した [Katayama *et al.*, 2016]。本光学衛星は、現在の計画では、常時ステレオ観測を行うような AT 方向ステレオ観測のための複数のラインセンサを搭載する計画にはなっていないが、軌道上で衛星の向きを変えるポインティング観測による随時のステレオ観測は可能である。なお、複数ラインセンサを搭載するような光学衛星の DEM ミッションを行う場合には、例えば表 1-1 における MOMS-2P や ZiYuan-3 などのように、センサ機器の衛星搭載サイズや重量の制限およびダウンリンクデータ量の制限などにより、斜め視観測を行うセンサの解像度を、直下視観測を行うセンサの解像度に対して低く設定する場合がある。更に未来におけるミッションでは、観測画像の高解像度化と上記制限とのトレードオフから、これに沿った仕様となる場合も十分に考えられる。よって、本章では、斜め視観測の解像度を 0.8 m から落とした場合のシミュレーション画像も併せて作成し、作成 DEM への影響を推定すると共に、それら精度低下に対する提案フィルタの効果も確認する。ここで、斜め視画像の解像度低下のパターンとしては、PRISM の場合の 2.5 m に対してその 1/2 である 1.25 m および 0.8 m の倍の 1.6 m とした。表 5-1 にこれらシミュレーション画像の解像度組み合わせについて整理する。ステレオ画像の B/H については、表 1-1 によれば、これまでの光学センサステレオ画像においてほぼ 0.4~0.6 が採用されているが、本研究では、MOMS-2P や PRISM と同じ 0.5 とした。なお、 $B/H = 0.5$ の場合のセンサ入射角 θ は、 $\theta = \tan^{-1}(0.5) = 26.6$ degree である。

表 5-1 ステレオシミュレーション画像の地上解像度組み合わせ

Nadir view	Slant view (B/H=0.5)
	0.8
0.8	1.25
	1.6

5.1.1 ステレオシミュレーションデータの作成

ステレオシミュレーション画像の基データとしては、航空機観測によるラインセンサデータである ADS40 を使用した。ADS40 は主に空中写真測量を目的として開発された航空機搭載のラインセンサであり、約 2000 m 程度の飛行高度にておよそ 0.2 m 程度の解像度によるパナクロ画像データを PRISM と同様のアロングトラック三方向視ステレオにて撮像可能である [Yotsumata *et al.*, 2002]。本研究にて用いた観測データは、三方向視について 28.4° 前方視, 16.1° 半前方視, 及び 14.2° 後方視の観測角にて取得されたが、28.4° 前方視データをシミュレーションの 26.6° 斜め視データ作成に、14.2° 後方視データをシミュレーションの直下視データ作成に使用した。なお、データは、第 2 章に述べた LiDAR 計測による参照 DEM のエリアを含む筑波山山頂を西から東へ約 9 km 飛行して取得したものであり、観測幅は約 2.4 km、地上解像度は 0.4 m に設定された。また観測日時は 2002 年 4 月 24 日である。

ステレオシミュレーション画像の作成は、ステレオ観測画像各画素に該当する視線ベクトルの地上入射角に対して、地形の標高差によって生じる歪（反射角方向への倒れ込み）を再現する処理となる [Tadono *et al.*, 2013]。具体的には、シミュレーション画像のセンサモデル、衛星軌道位置・姿勢を定義し、シミュレーション画像の各画素の DEM への投影モデルと ADS40 各画素の同投影モデルを用いて、ADS40 画像の各画素値をシミュレーション画像の座標値に投影する手続きである。すなわち、投影には DEM が必要になるが、ここでは第 2 章に示した LiDAR 計測による DEM を使用する。図 5-1 にシミュレーション画像投影モデルの概念について示す。

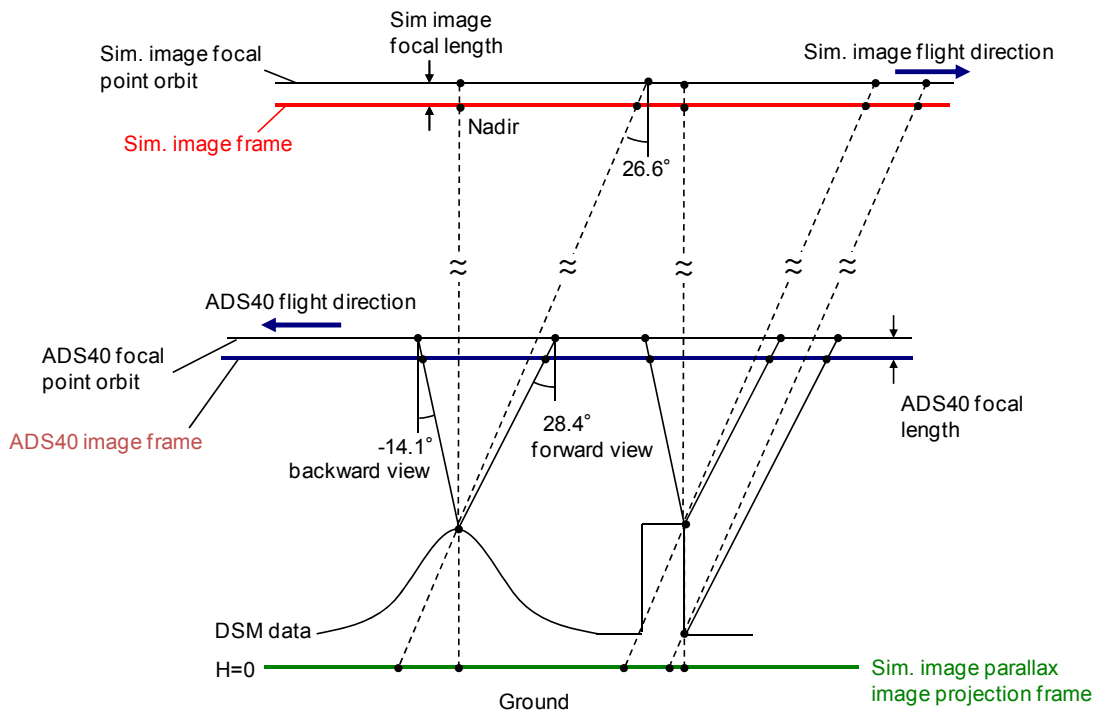


図 5-1 シミュレーション画像投影モデル

シミュレーション画像のセンサモデルとしては、主に画像解像度に伴う焦点距離 f 、ディテクタサイズ d 、ラインサンプル間隔 g_a 、ディテクタ数 L が挙げられるが、 f と d については以下の関係があり

$$f = \frac{d \cdot H}{g_c \cdot \cos\theta} \quad (5.1)$$

ここで、 g_c 、 H はそれぞれシミュレーション画像の CT 方向地上解像度および衛星高度である。本研究では、衛星軌道 H を除くこれらパラメータについて、ADS40 の地上解像度 (= 0.4 m) および観測幅 (= 2.4 km) に合わせるように設定を行った。また、衛星軌道 H は、標準的な高解像度光学衛星における 600~700 km の中から任意に 618 km とし、姿勢はオイラー角が全て 0 の理想状態を仮定して投影処理を行った。また、衛星の軌道方向は ADS40 撮影方向に沿った東西方向とし、斜め視は便宜上後方視とした。投影を行った画像全景について図 5-2 に示す。

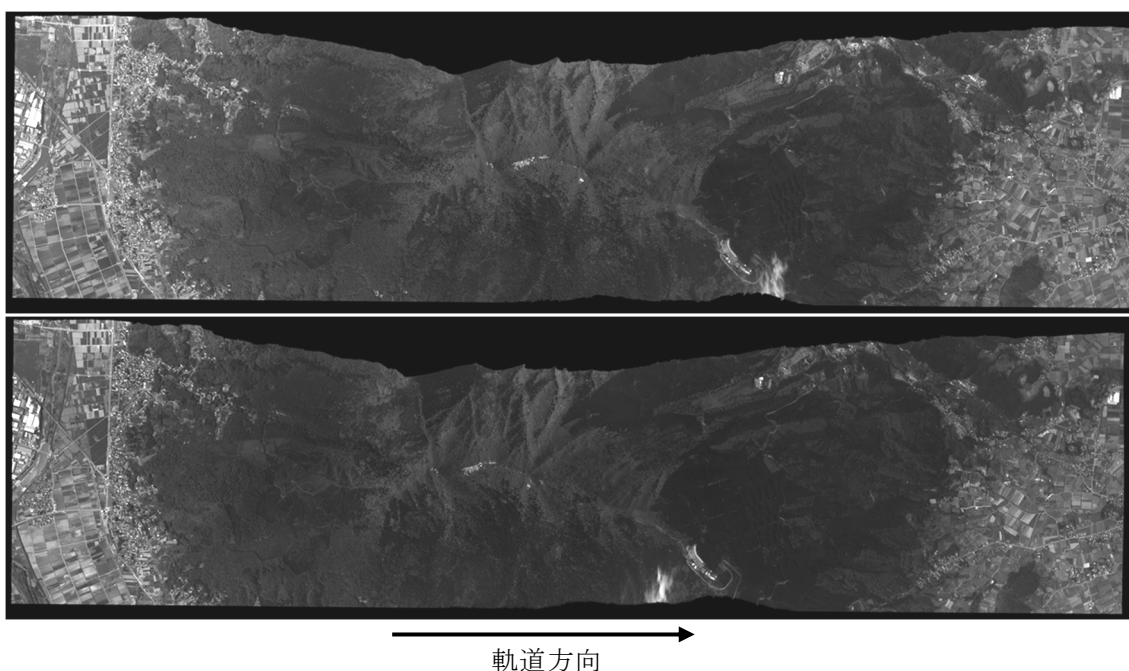


図 5-2 ADS40 による衛星光学ステレオシミュレーション画像（筑波山山頂付近）
上：直下視，下：斜め視（後方視），各 2.4 km x 9.0 km

次いで、0.4 m 解像度による投影済みシミュレーションデータについて、表 5-1 に基づく解像度変換を、ラジオメトリックシミュレーションと併せて行った。ラジオメトリックシミュレーションとしては、画像の MTF、S/N、ダウンリンク時のデータ圧縮ノイ

ズについて、それぞれALOSの後継として計画されている光学衛星の仕様を参考に適用した [Imai *et al.*, 2013]。作成した各解像度によるシミュレーション画像の一部拡大図について図 5-3 に示す。

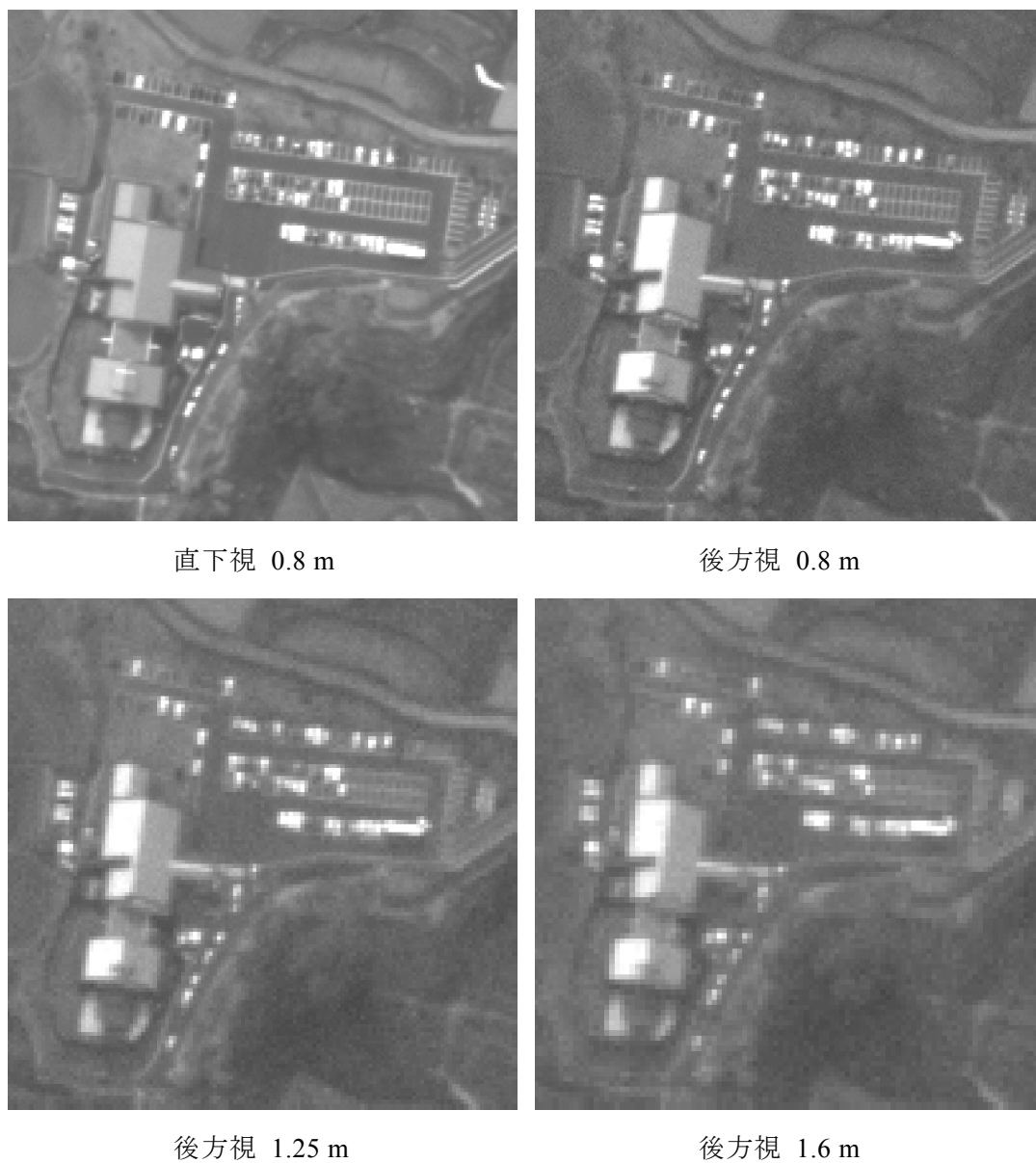


図 5-3 作成した各解像度によるシミュレーション画像の一部拡大図 (160 m x 160 m)

5.1.2 DEM 処理

作成した直下視及び後方視シミュレーションデータのステレオマッチングでは、それぞれの画像を図 5-1 における H (標高) = 0 の投影面にエピポーラ投影し、視差の計測を行う。マッチングアルゴリズムは第 2 章に述べた NCC によるエリアベース方式の 2 方向視の場合と同一のものを使用した。出力する DEM は等緯度経度座標にリサンプリングし、そのピクセルスペーシングは、0.1 秒 (約 3 m) に設定した。また、ステレオ画像データの存在しないエリア、雲による影響が見られるエリア、或いはデータ観測時期の違いにより画像データと LiDAR DEM との間で明らかに地形が異なるエリア (山腹の植林域) をマニュアル編集によりマスクした。

作成した各解像度の組み合わせによる DEM について、後方視 0.8 m による DEM のグレースケール表示及び、同一フレームに直下視画像を投影したオルソ画像の概要について図 5-4 に示す。

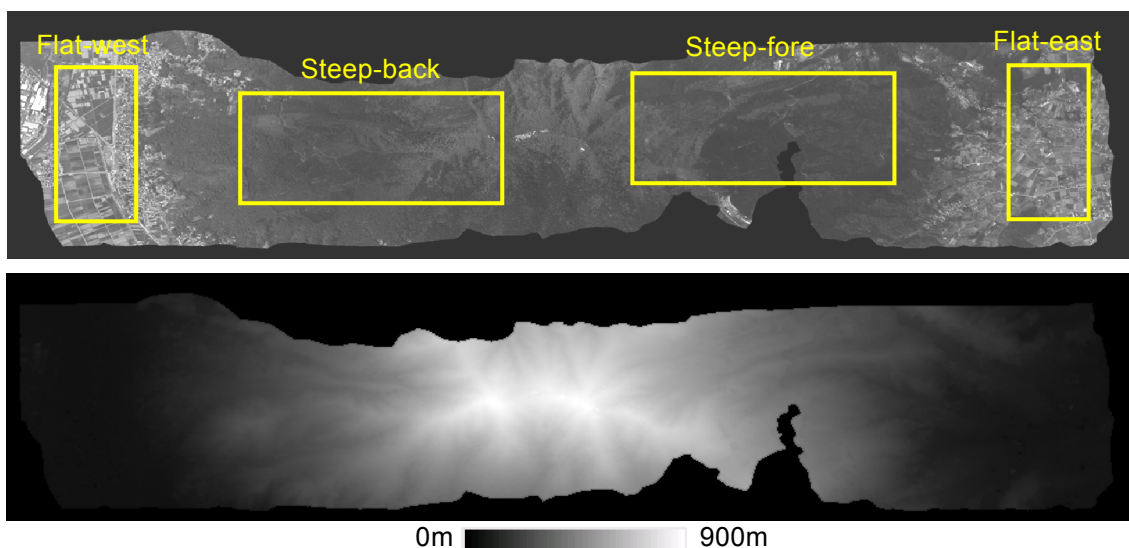


図 5-4 後方視 0.8 m による DEM (下) 及びオルソ画像 (上) の概要

作成したオリジナル DEM の精度は、その基となったシミュレーション画像の作成に使用した LiDAR DEM を参照 DEM データとして評価する。評価は、作成した DEM のフレームに参照 DEM をリサンプリングして高さの差を比較する。

図 5-5 に比較結果としての後方視 0.8 m の場合の差画像を示す。各解像度組み合わせによる DEM の高さの差の統計値としては、マスクを除いた画像全体 (Whole) の他に図 5-4 のオルソ画像上に示した筑波山西側の平坦域 (Flat-west), 筑波山西側斜面 (Steep-back: 後方視から見て裏斜面), 筑波山東側斜面 (Steep-fore: 後方視から見て表斜面), 及び筑波山東側の平坦域 (Flat-east) の 4 エリアを別途指定して算出した結果を表 5-2 に示す。

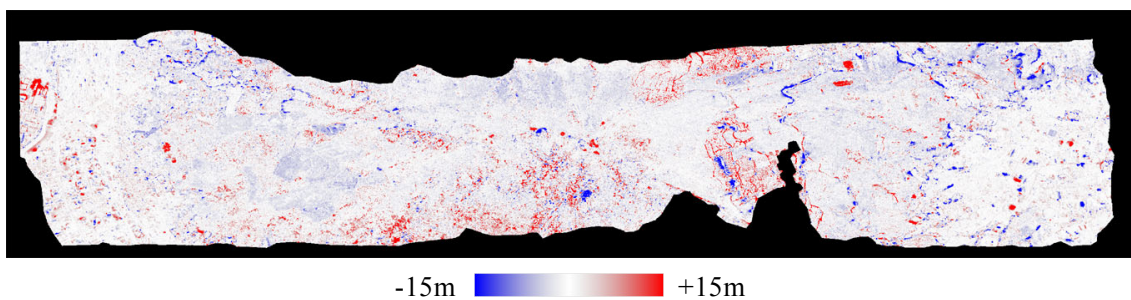


図 5-5 後方視 0.8 m による DEM の参照 DEM による差画像

表 5-2 各解像度組み合わせによる DEM の参照 DEM からの高さの差の統計値(単位: m)

area	back-reso.	ave.	std.dev.	rms	max	min
Whole	0.8	-0.145	4.097	4.100	64	-65
	1.25	0.114	4.209	4.210	75	-69
	1.6	0.503	4.375	4.404	71	-70
Flat-west	0.8	0.862	2.935	3.059	32	-65
	1.25	1.104	3.129	3.318	31	-65
	1.6	1.397	3.259	3.546	32	-65
Steep-west	0.8	-0.617	3.446	3.501	30	-31
	1.25	-0.372	3.554	3.574	30	-27
	1.6	0.051	3.665	3.665	33	-27
Steep-east	0.8	-0.330	4.316	4.328	32	-46
	1.25	-0.117	4.428	4.430	33	-42
	1.6	0.220	4.665	4.670	33	-50
Flat-east	0.8	-0.214	3.691	3.697	58	-36
	1.25	0.079	3.758	3.759	58	-34
	1.6	0.400	4.025	4.045	56	-38

図 5-5, 表 5-2 によれば, DEM 誤差の標準偏差は森林などの植生に覆われた傾斜地で 3~5 m 程度, 平坦地で 3~4 m 程度となっており, 第 1 章で述べたオリジナル画像解像度の約 2 倍といった標準的な誤差からすると大きなものになっている。また, 誤差はほぼ森林に覆われた斜面で比較的大きくなっており, PRISM の場合の結果に沿うものとなっているが, 森林域の誤差については画像の高解像度化に伴い,

- ・ データ取得時期の違い (ADS40:2002/4 ⇔ LiDAR:2007/1)
- ・ 森林密度に基づく算出樹高の違い (ADS40:ほぼ樹冠 ⇔ LiDAR:一部林床)

といった計測システム自身の誤差の影響が PRISM の場合に比して大きくなっている可能性もある。更に、ステレオシミュレーション画像の基データである ADS40 のステレオ視における B/H が 28.4° 前方視と 14.2° 後方視による 0.8 と比較的大きいため、幾何シミュレーションとしては B/H = 0.5 換算に再投影されているものの、地上のラジオメトリックな地表面反射特性に対してはその影響が特に平坦域の水田などで大きく残っており、結果として平坦域においてもランダムノイズが大きくなっているものと思われる。

一方、解像度の組み合わせの違いに沿った誤差の傾向としては、表 5-2 から、後方視画像解像度の低下に伴いほぼ線形に増加することが確認された。これらの傾向は、平坦域や斜面域など地形の違いに対してあまり変化が無いことが判った。表 5-2 の各エリアにおける標準偏差について、解像度の組み合わせに沿った低下の遷移を図 5-6 に示す。

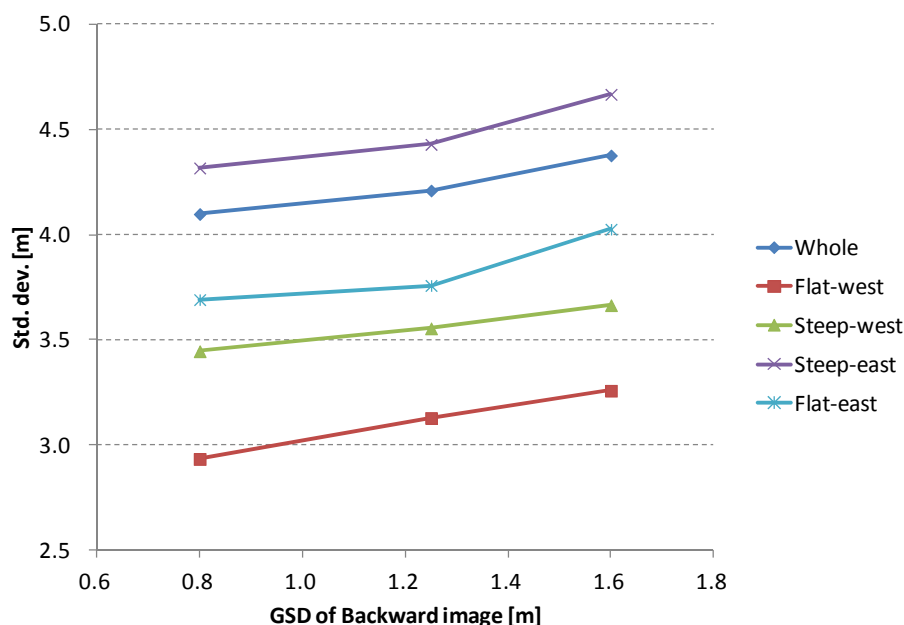


図 5-6 各エリアにおける DEM 誤差標準偏差の後方視解像度間比較

以上、将来衛星を想定して作成した DEM は、上記のシミュレーション上の制約によりやや誤差の大きいデータとなっているが、本章の目的である提案フィルタの汎用性、および異なる解像度画像の組み合わせによる DEM に対する効果を確認するためのデータとしては問題ないと判断し、そのままサンプルとして使用することとした。

5.2 ノンローカルフィルタの適用

直下視の解像度 0.8 m に対する後方視の解像度が 0.8 m, 1.25 m, 1.6 m と異なる場合を想定して作成した将来光学衛星のシミュレーション DEM について、第 4 章で提案を行ったランダムノイズ低減手法の適用を行い、その有効性および汎用性について確認する。使用するノンローカルフィルタとしては、DEM の平坦地におけるランダムノイズが比較的大きいことから、高さの局所分散を重みに用いた式 4.11 によるモデルを使用することとした。フィルタに設定するパラメータ、 $N \times N, n \times n$ については、第 4 章で設定したものと同様画像マッチングの NCC テンプレートサイズに基づくそれぞれ $51 \times 51, 5 \times 5$ とし、 σ_r についてはシミュレーションデータのラジオメトリック仕様に基づき設定した。

フィルタ適用前後の各 DEM の陰影図 (Shaded Relief) について、図 5-4 の 4 エリアにおけるそれぞれ $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ の拡大図を、直下視シミュレーション画像および参照 DEM (LiDAR-DEM) と併せてそれぞれ図 5-7 ~ 図 5-10 に示す。フィルタ適用後の各 DEM についての各エリアにおける参照 DEM からの高さの差の統計値 (単位: m) について、表 5-3 に示す。

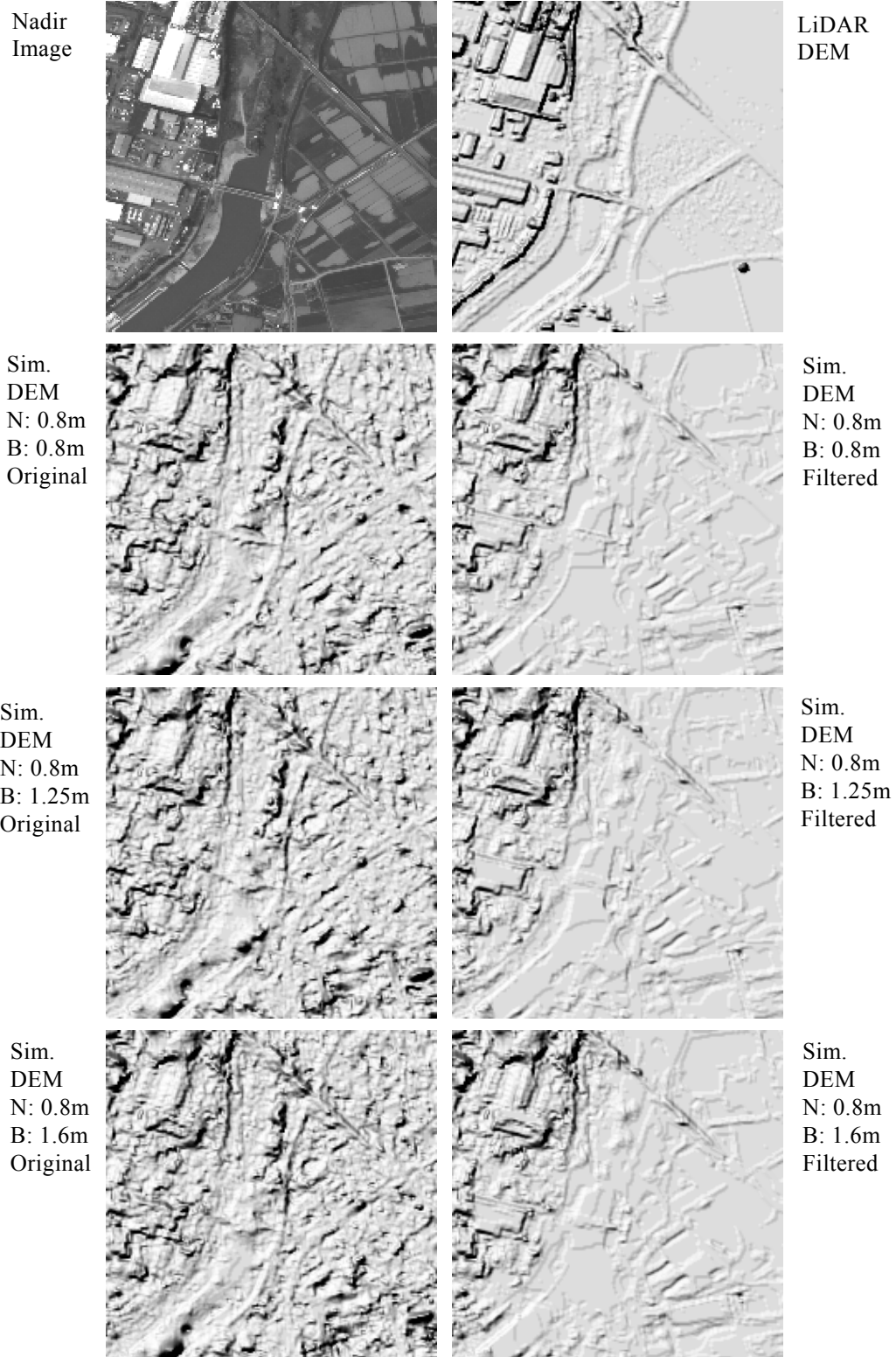


図 5-7 将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較
 - Flat-west - (各 600 m x 600 m)

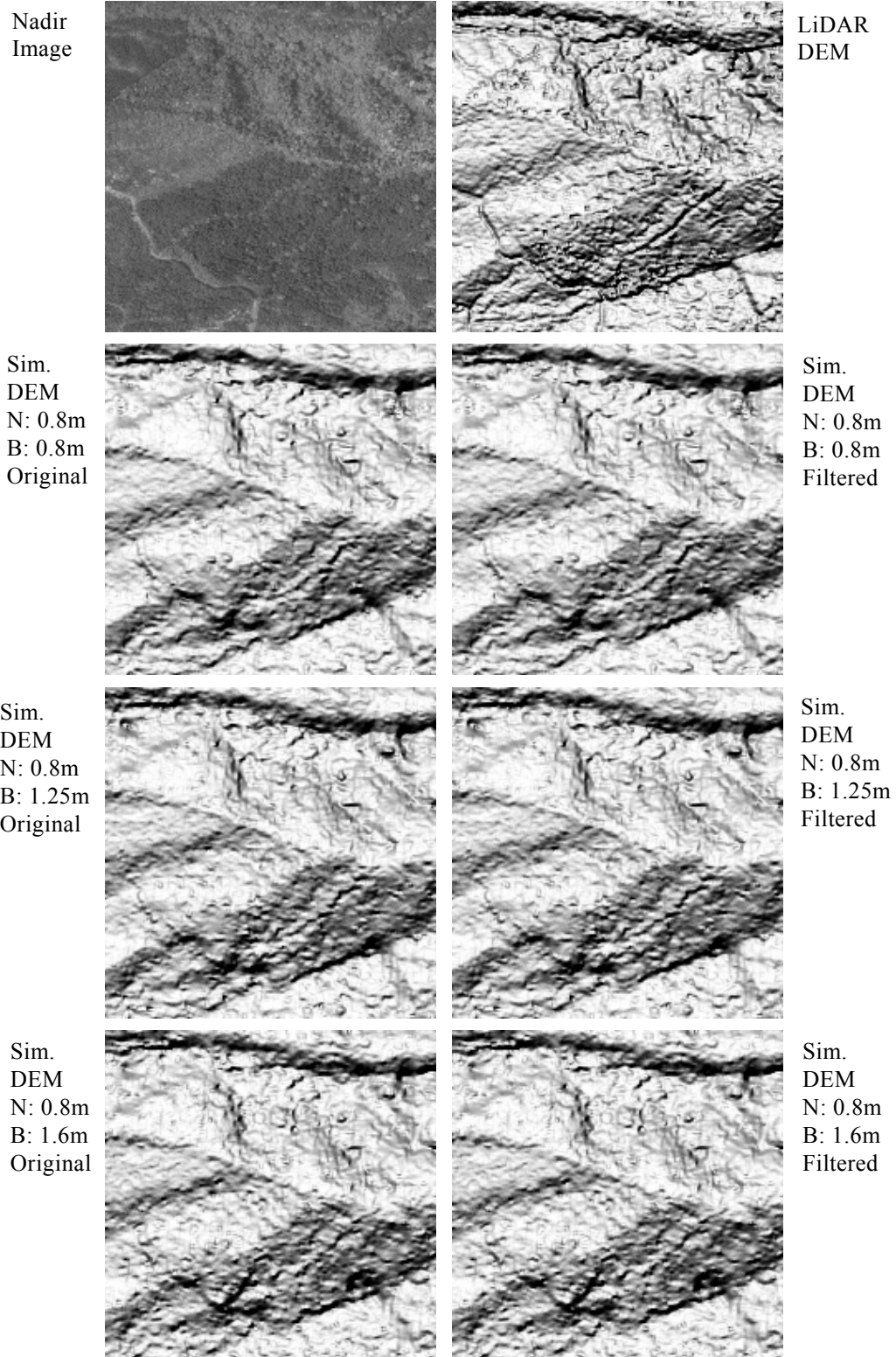


図 5-8 将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較
 - Steep-back - (各 600 m x 600 m)

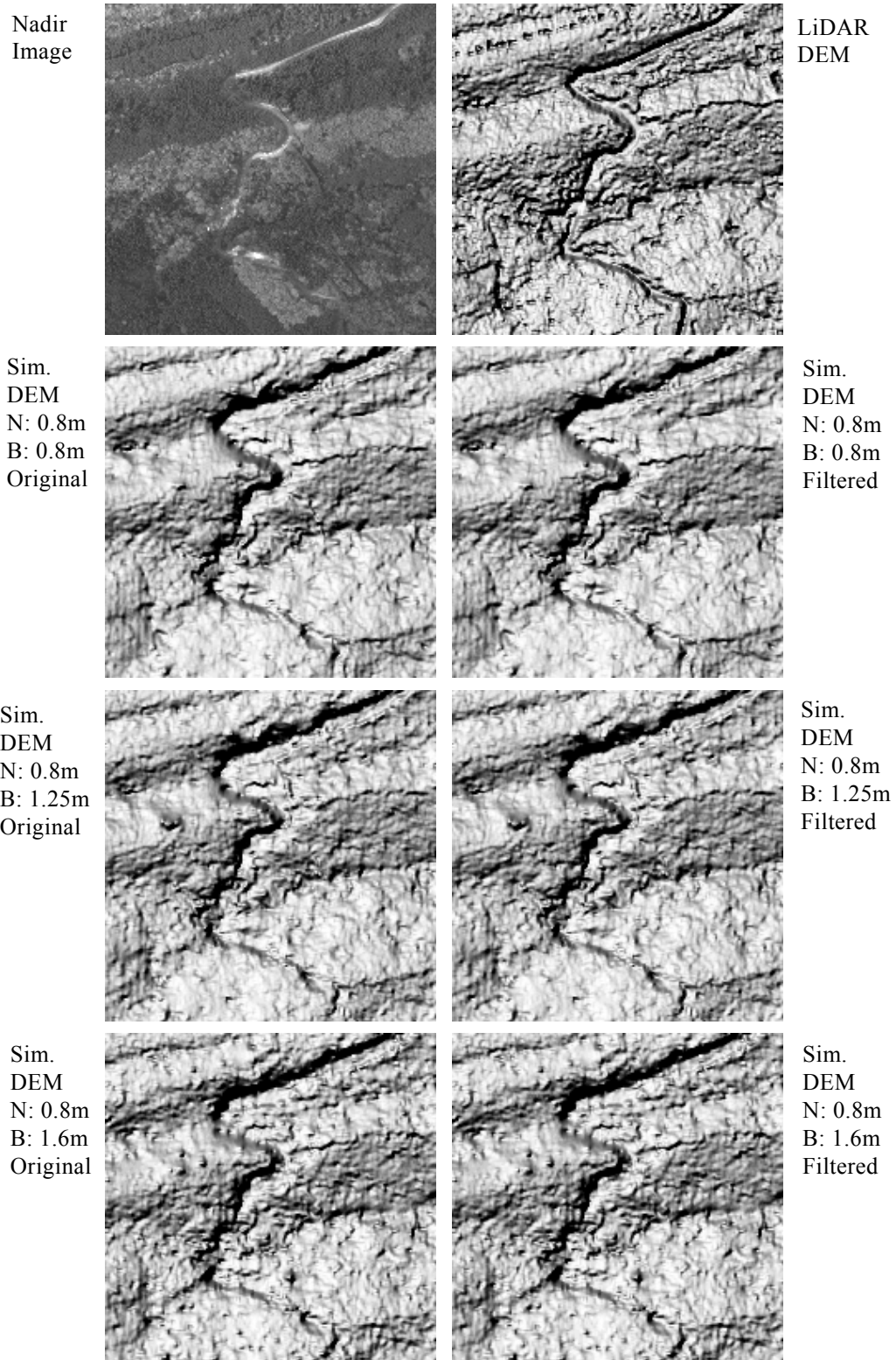


図 5-9 将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較
 - Steep-fore - (各 600 m x 600 m)

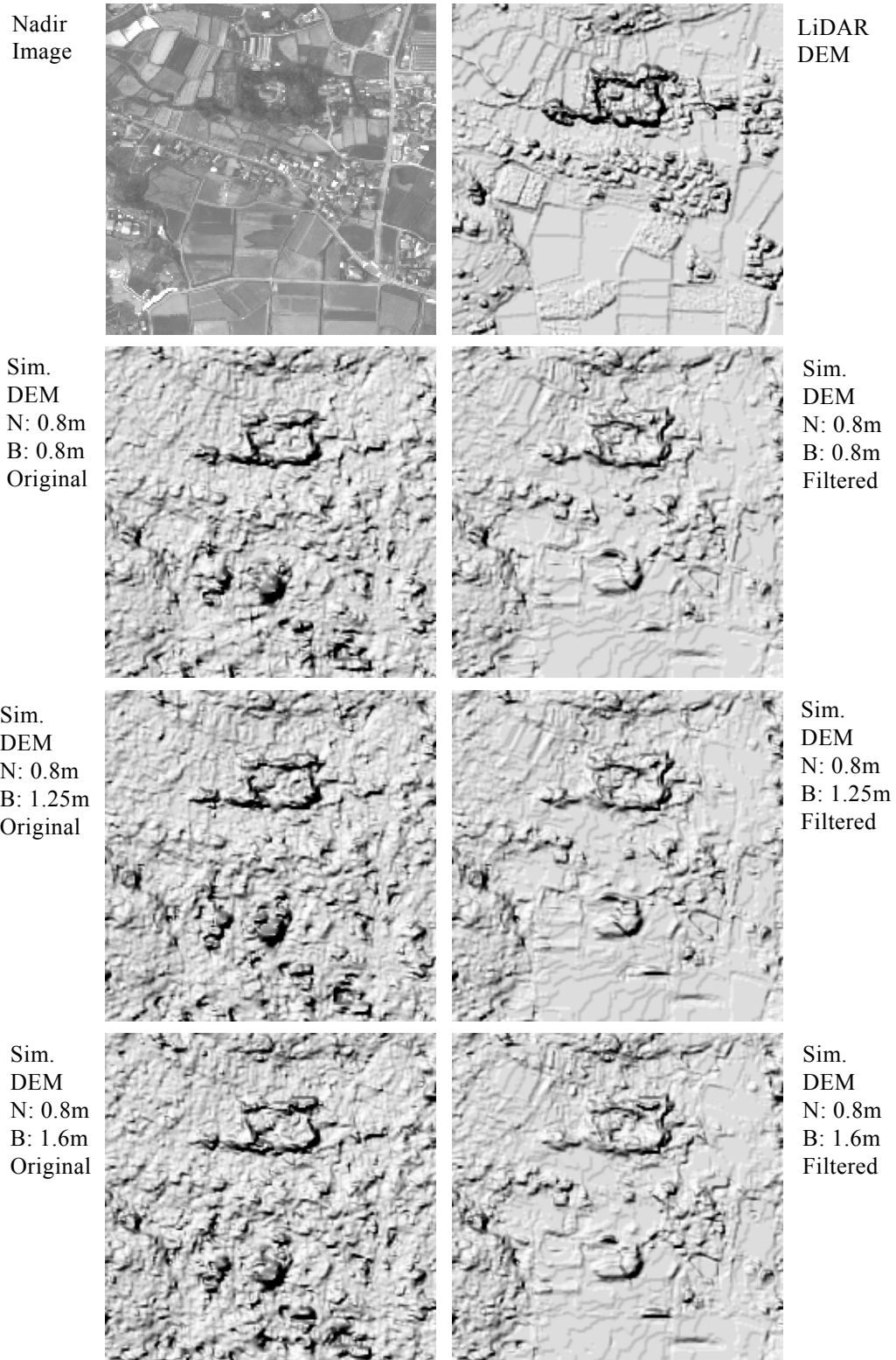


図 5-10 将来光学シミュレーション画像による DEM 陰影図 (Shaded Relief) の比較
 - Flat-east - (各 600 m x 600 m)

表 5-3 ノンローカルフィルタ適用 DEM の参照 DEM からの高さの差の統計値(単位: m)

area	back-reso.	ave.	std.dev.	rms	max	min
Whole	0.8	-0.167	3.988	3.991	64	-63
	1.25	0.093	4.092	4.093	75	-69
	1.6	0.482	4.238	4.266	71	-70
Flat-west	0.8	0.771	1.817	1.974	21	-63
	1.25	1.015	1.874	2.131	20	-63
	1.6	1.293	1.877	2.279	21	-63
Steep-west	0.8	-0.617	3.446	3.501	30	-31
	1.25	-0.372	3.555	3.574	30	-27
	1.6	0.051	3.665	3.665	33	-27
Steep-east	0.8	-0.348	4.296	4.311	32	-46
	1.25	-0.134	4.411	4.414	33	-42
	1.6	0.203	4.649	4.653	33	-50
Flat-east	0.8	-0.252	3.139	3.149	27	-31
	1.25	0.048	3.154	3.155	26	-31
	1.6	0.379	3.341	3.362	28	-32

図 5-7, 図 5-10 によれば, 水田や田畑などの平坦域で顕著に見られる DEM のランダムノイズについて, ややその区画等に沿った凹凸は残るもののほぼ適切に低減されている様子が確認できる。また, 建物, 道路, 橋などの人工構造物や, 局所的な森林エリアによる高さについてはそのまま保存されていることが判る。後方視の解像度の違いに沿った DEM の精度の違いについては, 図 5-7, 図 5-10 から視覚的には大きな差は確認できないが, 表 5-3 における定量評価では, 特に平坦域西側の Flat-west について DEM 誤差の標準偏差が 2.9~3.3 m から約 1.8~1.9 m に低下しており, ノイズの低減に加え, DEM の基画像とした後方視画像の解像度間の違いも低減されていることが確認された。これら各後方視解像度の異なる DEM の各エリアにおける標準偏差のフィルタ前後による比較について図 5-11 に示す。

一方, 図 5-8, 図 5-9 および表 5-3, 図 5-11 によれば, 山岳森林エリアでのフィルタによる効果は比較的小さく, 東側斜面の Steep-fore における標準偏差の数 cm 程度の改善にとどまっているが, これらのエリアでは PRISM の DEM の場合と同様に, フィルタ前のオリジナル DEM の時点で計測方式の違い自体に由来するシステムノイズが含まれている可能性も考えられる。よって, これらのエリアで重視されるのは, 少なくともオリジナル DEM の精度をフィルタによるスムージングによって損なわない点であるが, その意味では十分に機能していると考えられる。

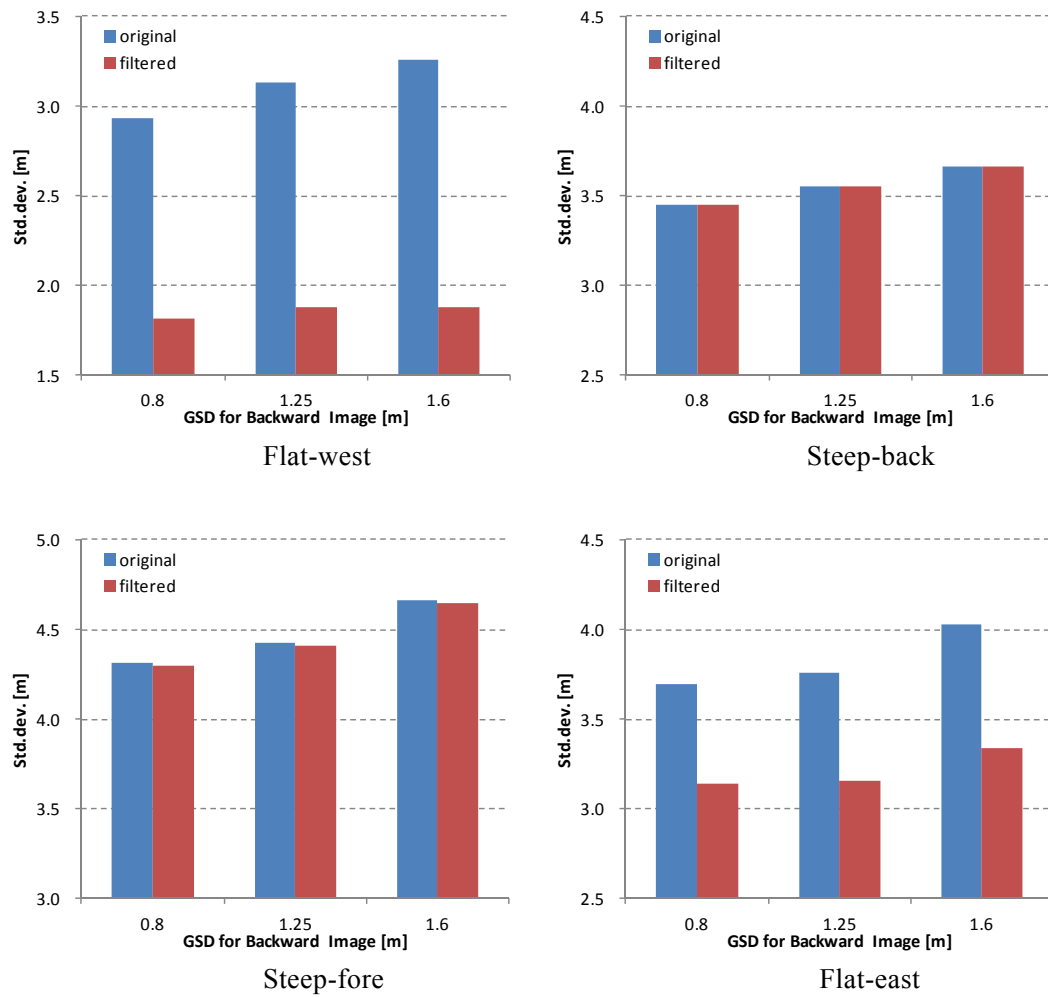


図 5-11 作成 DEM の各エリアにおける標準偏差のフィルタ前後による比較

5.3 将来衛星適用性確認まとめ

将来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、第4章で提案を行ったランダムノイズ低減手法適用の有効性・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 ADS40 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 の場合と同様に標準偏差にて 1 m を超える低減が可能であることを確認できた。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後方視センサの地上解像度を落とした構成にした場合に生じる DEM の精度低下に対しても、平坦域における低下の幅を後処理による提案フィルタの適用にて低減できることが示された。今後は、提案フィルタの汎用性についてより高めるために、より多様なラジオメトリック特性、画像解像度、ステレオ構成による DEM について、より多様な地形やテクスチャなどを持ったエリアによる検証が望まれる。

第6章 おわりに

6.1 結論

本研究では、世界のグローバル DEM 作成ミッションにおいて利用されている衛星光学センサステレオ画像由来の DEM について、現時点で比較的高い解像度・精度を持つ PRISM による DEM を用いることによりその高さ計測ノイズの特性を解析し、それらを低減する手法の検討を行った。光学センサ由来の DEM に発生するノイズは、主に衛星の幾何学的なモデルの誤差から生じるシステムノイズと、主にステレオ画像マッチングの誤差から生じるランダムノイズとに分類される。ここで、システムノイズの中では特に衛星の姿勢ジッタによる衛星進行方向に沿った周期的なノイズが問題になる場合がこれまでも多く報告され、PRISM による DEM においても現れていることが確認されたため、その解析及び低減の手法について提案を行い、検証によりその効果を確認することができた。一方、ランダムノイズについては、画像マッチングで発生する誤差を後処理で低減するための新たな適応的フィルタを開発し、その効果については PRISM による DEM のみならず、将来の DEM 作成ミッションで想定されるより高解像度の DEM に対しても有効であることが確認できた。以下、各成果についてまとめる。

衛星の姿勢ジッタは、衛星の姿勢制御のためのリアクションホールや電力源である太陽電池パドル、或いはデータ通信用の指向性アンテナ、といった機械動作を伴う擾乱源によるものであり、程度の違いはあるにしても基本的にほぼ全ての衛星に発生していると言える。これらの姿勢振動が衛星搭載の姿勢センサにより十分な精度で計測できていれば問題ないが、特にステレオ画像間の相対的なサブピクセルレベルまでの視差を用いる DEM 作成においてはより高度な姿勢計測精度が求められ、仮に必要な精度が満たせない場合に高さの周期ノイズとなって現れる。PRISM による DEM の場合は、ジッタ発生源の違いにより比較的低周波および高周波な 2 種類のノイズが検知された。前者については、該当ジッタ成分を計測している衛星の姿勢データについて応答誤差の影響によりそのままの適用では有効に機能しない場合でも、作成 DEM のジッタノイズの傾向を姿勢データの応答誤差にフィードバックすることで、DEM の補正が十分可能となることを示した。後者については、該当ジッタ成分を計測した姿勢データが利用できないことから、後処理としてこれらノイズの特性に適した DWT フィルタを適用することでノイズを効率的に低減できることを示した。DWT フィルタにおいて重要となるウェーブレット関数の選択および閾値の決定指標に対しては、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 MRA の水平・垂直成分の差異を用いる手法を提案し、その有効性を確認した。また、衛星搭載姿勢センサの仕様設定等、DEM のシステムノイズに係るハードウェア設計側の問題点や、センサモデル等ノイズ解析に必要な情報開示の重要性について述べた。これら姿勢ジッタに係る解析およびノイズ低減手法は DEM におけるシステムノイズの低減のみならず、今後の衛星光学センサによる DEM

作成ミッションにおいて、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センサ計測値の軌道上における特性を解析する上でも有用であると思われる。

ランダムノイズ低減のための適応的フィルタ手法としては、自然画像の適応的なノイズ除去を目的として開発されたノンローカルフィルタを適用する新たな手法を提案した。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定義し、PRISM から作成した DEM に対して適用した結果については、目視による検査のほか参照 DEM を用いた定量評価を行って、特に水田や田畑等の平坦域において多発するランダムノイズを劇的に低減できることを確認した。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。更に、本手法については、将来光学衛星 DEM 作成ミッションで想定されるより高解像度な DEM のシミュレーションデータに対して適用を行い、その有効性・汎用性を確認すると共に、ミッションの制約によりセンサ解像度に一定の制限が掛った場合にも DEM の精度低下への影響を一部低減する効果があることを示した。本フィルタは、アルゴリズムとしての汎用性は高く、光学センサ由来のすべての DEM にほぼそのまま適用できることから、将来衛星のシミュレーションデータに対して示したように今後の DEM 作成ミッションにおけるデータセット高精度化への適用が期待できる。

DEM 作成は、衛星および各種センサによる観測装置とその観測データの処理アルゴリズムとが両輪となっており、より良い成果を得るためには双方の特徴を踏まえた検討が必須であるが、本研究で得られた成果は、将来衛星のセンサ解像度などの仕様を考慮する際の参考技術としての貢献も期待できる。

6.2 今後の展望

今後の課題としては、まず本研究で適用した手法を PRISM や ADS40 以外のセンサから得られた DEM に適用し、手法の一般性を強化する必要があると考えられる。

システムノイズ低減手法については、本研究で提示した DEM のジッタノイズと姿勢データの誤差との関係性や、ノイズ低減のためのフィルタパラメータの設定方針については十分一般性があると考えられるが、具体的な姿勢データの解析や詳細なパラメータ設定値などは対象とする衛星や DEM の解像度・精度および各ジッタノイズの特性に沿って検討する必要があることが考えられる。また、第3章の最後でも触れたとおり、本研究で適用した DWT によるフィルタは、ある一定広域エリアに散在するジッタノイズを効率的に低減する手法としての効果は認められるものの、局所的には微細なフィルタノイズなどが伴うことも確認されており、これらの問題を補うようなより高度なフィルタ開発が望まれる。

ランダムノイズ低減手法については、第4章に触れたスタック済み DEM データや、ASTER など PRISM, ADS40 以外のセンサから作成した DEM, およびこれら異なるセンサによる DEM の融合データに適用した場合の検証などが、計算時間の短縮と併せた直近の課題として挙げられる。また、更なる高度なフィルタとして、画像内特徴と地形特徴との直接的な因果関係や、地形の連続・不連続性との関係などを教師データとして与えることでモデル化し、それらを正則化項として加えるような学習機能を持つアルゴリズムなども検討の余地があり今後の課題としたい。

本研究では、DEM に対するノイズ低減の効果について、目視による定性的且つ参照データによる定量的な評価を行っているが、これら DEM の応用分野における効果の確認についても重要な課題である。特に DEM の主要な応用分野の一つである洪水予測などの流出解析における効果の確認は今後の優先的な課題と考える。

最後に、本研究で得られた成果を将来衛星による DEM ミッションに活かしていくためには、画像の高解像度化など観測機器の高度化に伴うシミュレーションを継続していくことが重要である。また DEM 作成に関わる研究者間の連携や成果の共有による参照データの拡充なども今後更なる DEM の高度化を図っていく上で重要な要素となる。

参考文献

- Airault, S., Gigord, P., Cunin, L., Breton, E., Bouillon, A., Gachet, R., Bernard, M., 2003. Reference3D Location Performance Review and Prospects. Proceedings of the ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, Hanover.
- Amberg, V., Dechoz, C., Bernard, L., Greslou, D., de Lussy, F., Lebegue, L., 2013. In-flight attitude perturbances estimation: Application to PLEIADES-HR satellites. Proceedings of SPIE 8866, Earth Observing Systems XVIII, California, USA, pp. 121-129.
- Ayoub, F., Leprince, S., Binet R., Lewis, K. W., Aharonson, O., 2008. Influence of Camera Distortions on Satellite Image Registration and Change Detection Applications. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2008, Boston, USA, pp. 7-11.
- Bernard, M., Decluseau, D., Gabet, L., Nonin, P., 2012. 3D Capabilities of Pleiades Satellite. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B3, pp. 553-557.
- Bignone, F., Umekawa, H., 2008. Assessment of ALOS PRISM Digital Elevation Model Extraction Over Japan. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII, Part B1, Beijing, pp. 1135-1138.
- Buades, A., Coll, B., Morel, J. M., 2005. A review of image denoising algorithms, with a new one. Multiscale Modeling & Simulation, 4, pp. 490-530.
- Buyuksalih, G., Jacobsen, K., 2001. Determination and Improvement of Digital Elevation Models based on MOMS-2P Imagery. Turkish-German Geodetic Days, Berlin.
- Buyuksalih, G., Baz, I., Alkan, M., Jacobsen, K., 2012. DEM Generation with WorldView-2 Images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B3, pp. 203-207.
- Castner, H. W., Wheate R. D., 1979. Re-assessing the Role Played by Shaded Relief on Topographic Scale Maps. The Cartographic Journal, 16/2: pp. 74-82.

- Chang, S. G., Yu, B., Vetterli, M., 2000. Adaptive wavelet thresholding for image de-noising and compression. *IEEE Transactions on Image Processing* vol. 9, no. 9, pp. 1532-1546.
- d'Angelo, P., Lehner, M., Krauss, T., Hoja, D., Reinartz, P., 2008. Towards automated DEM generation from high resolution stereo satellite images. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B4, pp. 1137-1142.
- Daubechies, I., 1992. *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pennsylvania.
- Daubechies, I., 1993. Orthonormal bases of compactly supported wavelets II. Variations on a theme. *SIAM Journal on Mathematical Analysis* 24, pp. 499-519.
- Deledalle, C., Denis, L., Tupin, F., 2011. NL-InSAR: Nonlocal interferogram estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 4, pp. 1441-1452.
- Donoho, D. L., Strak, P., 1989. Uncertainty principles and signal recovery. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 49, no. 3, pp. 906-931.
- Donoho, D. L., Johnstone, I., M., 1994. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika* 81: 425-455.
- Donoho, D. L., 1995. De-noising by Soft-thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, no. 3, pp. 613-627.
- Donoho, D. L., Johnstone, I. M., 1995. Adapting to Unknown Smoothness via Wavelet Shrinkage. *Journal of American Statistical Association*, vol. 90, pp. 1200-1244.
- Evans, G. A., Ramachandran, B., Zhang, Z., Bailey, G. B., Cheng, P., 2008. An Accuracy Assessment of Cartosat-1 Stereo Image Data-Derived Digital Elevation Models: A Case Study of the Drum Mountains, Utah. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, Part B1, Beijing, pp. 1161-1164.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Wemer, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Review of Geophysics* 45 (RG2004), pp. 1-33.

- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jen-sen, J. L., Carbonneau, P. E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), pp. 421-430.
- Foroosh, H., Zerubia, J., Berthod, M. 2002. Extension of phase correlation to sub-pixel registration. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 3, pp. 188-200.
- Fritsch, D., Stallmann, D., 2000. Rigorous Photogrammetric Modeling Processing of High Resolution Satellite Imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Part B1. Amsterdam, pp. 313-321.
- Fujisada, H., Bailey, G. B., Kelly, G. G., Hara, S., Abrams, M. J., 2005. ASTER DEM Performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 12, pp. 2707-2714.
- Fujisada, H., Urai, M., Iwasaki, A., 2011. Advanced Methodology for ASTER DEM Generation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 12, pp. 5080-5091.
- Fukami, K., Tanaka, S., Inomata, H., Yamashita, H., 2011. Study on Applicability of ALOS Data for Flood Inundation Simulation. *Final Reports of the ALOS Research Announcement Programs*, JAXA, PI397, pp. 1-10.
- Gallant, J. C., 2011. Adaptive Smoothing for Noisy DEMs. *Proceedings of Geomorphometry 2011*, Redlands, U.S.A., pp. 7-11.
- Gao, X., Tang, X., Zhang, G., Zhu, X., 2013. The Geometric Accuracy Validation of The ZY-3 Mapping Satellite. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Hong Kong, China, Vol. XL-2/W1, pp. 111-115.
- Gesch, D., Oimoen, M., Greenlee, S., Nelson, C., Steuck, M., Tyler, D., 2002. The national elevation dataset. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol.68, no.1, pp. 5-32.
- Girod, L., Nuth, C., Kaab, A., Improvement of DEM Generation from ASTER Images Using Satellite Jitter Estimation and Open Source Implementation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-1/W5, pp. 249-253.
- Gruen, A., 1985. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14 (3), pp.175-187.

- Gruen, A., Zhang, L., 2002. Automatic DTM Generation from Three Line Scanner (TLS) Images, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol.34, Part 2A, Graz, Austria, pp.131-137.
- Hartley, R. I., Gupta, R., 1994. Linear pushbroom cameras. In European Conference on Computer Vision, vol. 800 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp. 555-566.
- Hasegawa, H., Matsuo, K., Koarai, M., Watanabe, N., Masaharu, H., Fukushima, Y., 2000. DEM Accuracy and the Base to Height (B/H) Ratio of Stereo Images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B4. Amsterdam, pp. 356-359.
- Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., 2002. Analysis of the results of the OEEPE test, "Integrated Sensor Orientation," OEEPE Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings, Editors: C. Heipke, K. Jacobsen, and H. Wegmann, OEEPE Official Publication No. 43, pp. 31-48.
- Hirschmuller, H., 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 30, no. 2, pp. 328-341.
- Imai, H., Ohgushi, F., Katayama, H., Sagisaka, M., Suzuki, S., Osawa, Y., Tadono, T., 2013. Wide Swath and High Resolution Stereo Mapping by PRISM-2 Onboard ALOS-3. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2013, Melbourne, Australia, pp. 2377-2379.
- Ismail, B., Khan, A., 2012. Image De-noising with a New Threshold Value Using Wavelets. Journal of Data Science vol. 10, pp. 259-270.
- Iwasaki, A., Fujisada, H., 2005. ASTER Geometric Performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 12, pp. 2700-2706.
- Iwasaki, A., 2011. Detection and estimation satellite attitude jitter using remote sensing imagery. Advances in Spacecraft Technologies 13, pp. 257-272.
- Iwata, T., Tadono, T., Kawahara, T., Abe, M., 2008. Precision Pixel Geolocation Determination for the Advanced Land Observing Satellite (ALOS). 59th International Astronautical Congress, IAC-08-C1.7.9, Glasgow, U.K..

- Iwata, T., Kawahara, T., Muranaka, N., Laughlin D. R., 2009. High-Bandwidth Attitude Determination Using Jitter Measurements and Optimal Filtering. Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference; Chicago, IL, USA, pp. 7349–7369.
- Jacobsen, K., 2003. DEM Generation from Satellite Data. In: EARSel (Hrsg.). Ghent, Millpress, pp. 273–276
- Jacobsen, K., 2004. Issues and methods for in-flight and on-orbit calibration. Post-Launch Calibration of Satellite Sensors, Editors: S.A. Morain and A.M. Budge, Taylor and Francis Group, London, pp. 83-91.
- Jacobsen, K., 2016. Analysis and Correction of Systematic Height Model Errors. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, Czech, Vol. XLI-B1, pp. 333-339.
- JAXA, 2006. ALOS/PRISM Level 1 Product Format Description. Revision J., Japan Aerospace Exploration Agency Earth Observation Research Center, NEB-01006.
- Kale, V. U., Khalsa, N. N., 2010. Performance Evaluation of Various Wavelets for Image Compression of Natural and Artificial Images. International Journal of Computer Science & Communication, vol. 1, no. 1, pp. 179-184.
- Kamiya, I., Saito, G., 2007. Reduction of JPEG and other noise for ALOS PRISM image. Proceedings of 28th Asian Conference on Remote Sensing.
- Katayama, H., Kato, E., Imai, H., Sagisaka, M., 2016. Wide swath and high resolution optical imaging satellite of Japan. Proceedings of SPIE 9881, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV, 98810Q.
- Koga, M., Iwasaki, A., 2011. Improving the Measurement Accuracy of Three-Dimensional Topography Changes Using Optical Satellite Stereo Image Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 8, pp. 2918-2923.
- Kornus, W., Lehner, M., 1999. Photogrammetric Point Determination and DEM Generation Using MOMS-2P/PRIRODA Three-Line Imagery. ISPRS Workshop on 'Sensors and Mapping from Space 1999', Hanover.
- Lee, J. S., 1983. Digital Image Smoothing and the Sigma Filter. Computer Graphics Image Processing, vol. 24, pp. 255-269.

- Lee, C., Theiss, H. J., Bethel, J. S., Mikhail, E. M., 2000. Rigorous mathematical modeling of airborne pushbroom imaging system. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66, No. 4, pp.385-392.
- Lewis, J. P., 1995. Fast normalized cross-correlation. *Vision Interface*, vol. 10, no. 1, pp. 120–123.
- Mallat, S. G., 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674-693.
- Matsuo, T., Fukushima, N., Ishibashi, Y., 2013. Weighted Joint Bilateral Filter with Slope Depth Compensation Filter for Depth Map Refinement. *Proceedings of International Conference on Computer Vision Theory and Applications 2013*, Barcelona, Spain.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M., 2010. *Wavelet Toolbox 4 User's Guide*, MATLAB Mathworks.
- Murakami, H., 1995. Accuracy Estimation of Digital Map Series Data Sets Published by the Geographical Survey Institute. *Geoinformatics*, vol.6, no.2, pp. 59-64.
- O'Sullivan, L., Stephane, B., Streilein, A., 2008. TLM – The Swiss 3D Topographic Landscape Model. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B4. pp. 1715-1720.
- Pestschnigg, G., Szeliski, R., Agrawala, M., Cohen, M., Hoppe, H., Toyama, K., 2004. Digital photography with flash and no-flash image pairs. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3), pp. 664–672.
- Poli, D., 2005. Modelling of spaceborne linear array sensors. *Doctoral Thesis*, No. 85, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
- Poon, J., Fraser, C. S., Zhang, C., Gruen, A., Zhang, L., 2005. Accuracy evaluation of terrain modelling from IKONOS stereo imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing Vol. 36, Part I/W3, Proceedings of ISPRS Workshop*, Hannover, Germany, 5 p.
- Raggam, H., Almer, A., 1996. Assessment of the Potential of JERS-1 for Relief Mapping Using Optical and SAR Data, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, Vol. XXXI-B4, pp.671-676.

- Rauter, H.I., Nelson, A., Strobl, P., Mehl, W., Jarvis, A., 2009. A first assessment of ASTER GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2009*, vol. 5, pp. 240–243.
- Reinartz, P., Lehner, M., Muller, R., Schroeder, M., 2004. Accuracy analysis for DEM and orthoimages derived from SPOT-HRS stereo data without using GCP. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, pp. 433-438.
- Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E., 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(3), pp. 249-260.
- Shimizu, M., Okutomi, M., 2002. An analysis of sub-pixel estimation error on areabased image matching. *14th International Conference on Digital Signal Processing*, pp. 1239–1242.
- Smith, M. J., 2010. Digital elevation models for research: UK datasets. *Elevation Models for Geoscience*. London, U.K., Geological Society, pp. 129-133.
- Springman, J. C., 2013. Satellite Attitude Determination with Low-Cost Sensors. A dissertation submitted for PhD (Aerospace Engineering), University of Michigan.
- Sugarbaker, L. J., Constance, E. W., Heidemann, H. K., Jason, A. L., Lukas, V., Saghy, D. L., Stoker, J. M., 2014. The 3D Elevation Program initiative - A call for action. U.S. Geological Survey Circular 1399, 35 p.
- Szeliski, R., Scharstein, D., 2002. Symmetric sub-pixel stereo matching. *Computer Vision — European Conference on Computer Vision 2002*, pp. 657–659.
- Tadono, T., Shimada, M., Murakami, H., Takaku, J., 2009. Calibration of PRISM and AVNIR-2 Onboard ALOS “Daichi”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 12, pp. 4042-4050.
- Tadono, T., Imai, H., Ohgushi, F., Takaku, J., Watanabe, T., 2013. Feasibility Study of PRISM-2 Onboard ALOS-3 – Simulated Image Generation –. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2013*, Melbourne, Australia, pp. 4439-4442.
- Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H., 2014. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-4, pp. 71-76.

- Takaku, J., Tadono, T., 2009a. PRISM On-Orbit Geometric Calibration and DSM Performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 12, pp. 4060-4073.
- Takaku, J., Tadono, T., 2009b. High Resolution DSM Generation from ALOS PRISM - Status Updates on Over Three Year Operations -. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2009*, vol. III, pp. 769-772.
- Takaku, J., Tadono, T., 2013. PRISM/DSM Mosaic Generation and Evaluation. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, vol. 33, no. 2, pp. 126-136.
- Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K., 2014. Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Suzhou, China, Vol. XL-4, pp. 243-248.
- Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K., Ichikawa, M., 2016. Validation of 'AW3D' Global DSM Generated from ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume III-4, pp. 25-31.
- Teshima, Y., Iwasaki, A., 2008. Correction of Attitude Fluctuation of Terra Spacecraft Using ASTER/SWIR Imagery With Parallax Observation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, no. 1, pp. 222-227.
- Tian, Q., Huhns, N., 1986. Algorithms for Subpixel Registration. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 35, pp.220-233.
- Tomasi, C., Manduchi, R., 1998. Bilateral filtering for gray and color image. *Proc. International Conference on Computer Vision*, IEEE, Bombay, India, pp. 839-846.
- Tong, X., Ye, Z., Xu, Y., Tang, X., Liu, S., Li, L., Xie, H., Wang, F., Li, T., Hong, Z., 2014. Framework of Jitter Detection and Compensation for High Resolution Satellites. *Remote Sensing*, vol. 6, no. 5, pp. 3944-3964.
- Toutin, T., 1995, Generating DEM from stereo-images with a photogrammetric approach: examples with VIR and SAR data *EARSel Advances in Remote Sensing*, vol. 4, pp. 110-117.
- Toutin, T., 2004a. Comparison of Stereo-Extracted DTM from Different High-Resolution Sensors: SPOT-5, EROS-a, IKONOS-II, and QuickBird. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 10, pp. 2121-2129.

- Toutin, T., 2004b. DSM generation and evaluation from QuickBird stereo imagery with 3D physical modeling. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, no. 22, pp. 5181-5193.
- Trinder, J. C., 2016. The Current Status of Mapping in the World - Spotlight on Oceania. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLI-B4, pp. 95-102.
- USGS, 2006. Landsat 7 (L7) Image Assessment System (IAS) Geometric Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). ver. 1.0, Department of Interior, U.S. Geological Survey.
- Wurm, M., d'Angelo, P., Reinartz, P., Taubenbock H., 2014. Investigating the Applicability of Cartosat-1 DEMs and Topographic Maps to Localize Large-Area Urban Mass Concentrations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, no. 10, pp. 4138-4152.
- Yotsumata, T., Okagawa, M., Fukuzawa, Y., Tachibana, K., Sasagawa, T., 2002. Investigation for mapping accuracy of the Airborne digital sensor-ADS40. *ISPRS Commission I Mid-Term Symposium in conjunction with Pecora 15/Land Satellite Information IV Conference, Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale*. Denver, USA.
- Zhu, X., Lachaise, M., Adam, F., Shi, Y., Eineder, M., Bamler, R., 2014. Beyond the 12m TanDEM-X DEM. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2014*, Quebec City, Canada, pp. 390-393.
- Zhu, Y., Wang, M., Zhu, Q., Pan, J., 2014. Detection and Compensation of Band-to-band Registration Error for Multi-spectral Imagery Caused by Satellite Jitter. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-1, pp. 69-76.
- Zink, M., Bachmann, M., Brautigam, B., Fritz, T., Hajnsek, I., Krieger, G., Moreira, A., Wessel, B., 2015. TanDEM-X: A Single-pass SAR Interferometer for Global DEM Generation and Demonstration of New SAR Techniques, *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015*, pp. 2888-2891.
- Zitova, B., Flusser, J., 2003. Image registration methods: A survey. *Image and Vision Computing*, 21, pp. 977-1000.

謝辞

学位論文を提出するにあたっては、様々な方々にお世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

主査の岩崎晃教授には、私が大学院の博士課程に入学する以前から論文や学会などを通じて多くのことを学ばせて頂きましたが、入学後は特に系統的な論理の組み立て方や客観的なものの見方の大切さについて改めて教えていただいたように思います。研究の進め方について迷い、論文をどのようにまとめていけばよいか分からなくなったときも、都度、貴重な助言をいただいたことが多くの励みになりました。また、先生の多方面での活躍を通してお話しいただいた衛星リモートセンシング分野に対する俯瞰的な見解や今後の課題に係る考察は、私がこの分野に今後も携わっていくにあたっての貴重な知見となっていくように思います。

副査を引き受けていただいた六川修一教授には、長年にわたって衛星リモートセンシングの研究に関わってこられ、DEM との関連も深い SAR 干渉処理研究の権威でもおられる立場から、研究の一般性と独自性の位置づけについて多くの指摘をいただきました。同じく副査を引き受けていただいた中村尚教授には、気象科学の権威でおられる立場から研究の一般性にかかる本質的かつ貴重な助言を頂きました。同じく副査を引き受けていただいた沖一雄准教授には、DEM との関わりも深い水環境評価についての研究を続けておられることから、DEM 利用側の観点としても多くの貴重な指摘をいただきました。同じく副査を引き受けていただいた矢入健久准教授には、長く研究を続けておられる機械学習分野に係り具体的且つ実践的な助言をいただいたのに加え、博士課程 1 年目に参加させていただいた合同輪講からも多くのことを学ばせていただきました。

JAXA 地球観測研究センターの田殿武雄氏には、私に今回の博士課程への入学のきっかけを与えていただいたばかりでなく、私が衛星 DEM に携わるきっかけとなった ALOS 衛星の PRISM センサに関しての研究に係り十年以上の長きにわたって大変お世話になりました。また、本研究で使用した PRISM データや参照データの利用にあたってもお世話になりました。改めてお礼申し上げます。

2017 年 2 月