

修士論文

四基準点法：
グローバルトランスフォーム位相アンラッ
ピング処理で生じる歪みの補正方法

指導教員 廣瀬 明 助教授



東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻

36305 大石 豪

平成17年1月31日提出

内容梗概

衛星等に搭載されている干渉型合成開口レーダシステムにより得られる位相画像には地表の高度情報が含まれており、いわゆるデジタル・エレベーション・マップ (Digital Elevation Map: DEM) を得ることが可能である。これを得るためには位相アンラッピングという操作が必要になり、その方法としてグローバルトランスフォーム位相アンラッピングが有効な方法として知られている。本論文は、まずこの処理の過程において高度の0次微分成分及び1次微分成分が欠落してしまうため、それらの値を推定する必要があることを指摘する。また、それらを補正する方法として四基準点法を提案する。さらに、この方法によりDEMが適正に補正されることに成功したことを示す。次に、四基準点法を実際の計測方法として応用するために、基準点の選び方について調べ、選ぶべき基準点の特徴を見いだしたことを示す。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	1
1.3 本論文の概要	2
第 2 章 InSAR システム	3
2.1 干渉型合成開口レーダ	3
2.2 高度測定原理	3
第 3 章 位相アンラッピング	5
3.1 位相アンラッピングと位相特異点	5
3.2 branch-cut Algorithm	5
3.3 Global Transform Phase Unwrapping	9
3.4 Region Growing Algorithm	12
3.5 利点と欠点	15
第 4 章 四基準点法	17
4.1 位相アンラッピングと補正	17
4.2 四基準点法の概要	18
4.3 基準点と補正面	19
第 5 章 四基準点法の検証	20
5.1 実験における諸設定	20
5.2 四基準点法の理論的検証	20
5.3 四基準点法の検証	33
第 6 章 基準点数およびその選択方法	40
6.1 実験における諸設定	40
6.2 基準点の配置	40
6.3 基準点の特徴	42
6.4 特徴を捉えた基準点の絞り込み	46
6.5 考察	47
第 7 章 まとめ	49
謝辞	50
参考文献	51
図目次	53

表目次

55

参考文献

56

第 1 章： 序論

1.1 研究の背景

レーダの浸透性を活用し、悪天候や夜のような測定が困難な状況にも関わらず地形の調査を可能にする地球規模の地形調査のためのレーダシステムの構築が重要である。その中で、航空機あるいは人工衛星等に搭載されている地表を観測するレーダとして合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) が実用化されており、地質や海岸の観測に利用されている。最近では、干渉型 SAR (Interferometric SAR: InSAR) 画像を用いることにより、測定電波の行路差を位相差として観測し、地球規模の地形の起伏の取得が可能であるため、InSAR システムが注目されている。

InSAR システムでは基本的に複数の異なる地点より観測される地表からのレーダ反射波を位相差として観測する。この位相差は $(-\pi, \pi]$ の範囲に折り畳まれており、地形の高度情報、即ちデジタル・エレベーション・マップ (Digital Elevation Map: DEM) を求めるためには、得られる位相情報を開く操作、即ち位相アンラッピングが必要である。位相アンラッピングにより得られる絶対的な値を持った位相を実際の地形の高度に対応させることにより、得られる DEM は実地形の起伏を表している。そのため、地核変動による地形の変化を調査することによって地震予知への応用や、地球上に関わらず、地球以外の惑星に対しても直接地表に到達することなく調査が可能であるというような、様々な分野での応用例が考えられている。このような応用において最も重要になる点は得られる DEM の精度である。一般的に地表からの反射波による InSAR システムによる位相情報には、地形の調査を困難にするノイズが存在することは否めない。実際に、観測される位相情報には特異点と呼ばれる位相アンラッピングを困難にする点が数多く存在し、位相アンラッピングによる DEM の精度を向上させるためには、その特異点による影響を考慮しなければならない。その結果、様々な分野での応用例が考えられていることもあり、位相アンラッピング方法も現在までに数多く提案されている。

一方で、数多く提案されている位相アンラッピング方法には、ある面で有効な方法もあるが、完全に満足のいく方法は存在しない。結果として得られる DEM の精度向上には、特異点を考慮した位相アンラッピング方法の提案のみならず、DEM の歪みに対して如何に補正を行うかということも問題である。

1.2 本研究の目的

InSAR システムを利用し得られる位相画像を用いて、地球規模の地形の起伏が取得可能である。そのためには位相アンラッピングという操作が必要であるが、広い応用が考えられており、数多くの方法が提案されている。しかしながら、位相画像には特異点が存在し、現在まで提案されている位相アンラッピング方法では、結果として得られる DEM の歪みが精度の面で問題である。そこで、提案されている位相アンラッピング方法の中から、一般的に用いられている計算時間が短く、全体的に DEM が得られる方法を選び、その有効な面を活かしながら、問題点を見だし、結果として得られる DEM の歪みを補正することによる精度向上を本研究の目的とする。

1.3 本論文の概要

本論文は以下のように構成される。第 2 章では、干渉型合成開口レーダシステムの概要と原理について述べる。第 3 章では、様々な位相アンラッピング方法とその利点、欠点について述べる。第 4 章では、本論文で提案する四基準点法の概要及び補正方法について述べる。第 5 章では、四基準点法の理論的検証を述べた後に、実際の応用性を考慮して少ない基準点数での検証を行った結果を示す。第 6 章では、四基準点法を用いた補正方法において基準点数と基準点の特徴を調べた結果を示す。第 7 章でまとめを述べる。

第 2 章 : InSAR システム

2.1 干渉型合成開口レーダ

レーダ電波を使って目標物や目標地域などを写真のような映像にして写し出すレーダを総称してイメージングレーダと呼ぶ。どのイメージングレーダも目標上の各位置ごとの反射強度分布を推定するものであり、2次元の映像とするためには直交する2軸について高い位置分解能が必要である。一方で、せん頭送信電力に制約のあるパルスレーダにおいて、探知距離を増大するには送信パルス幅を広くする必要があるが、距離分解能を向上させるためには送信パルス幅を狭くする必要がある。そのため、送信パルスとしてパルス内に特殊な変調を施したパルス幅の広い送信信号を用い、受信後の処理においてその復調を実施して狭いパルス幅に変換する技術としてパルス圧縮がある。このパルス圧縮技術を利用して、レーダと目標を結ぶ方向、即ちレンジ方向の高分解能化を実現し、これに直交するクロスレンジ方向については、目標とレーダの相対的な運動により生起するドップラー周波数の目標各部ごとの微妙な違いを分解するという手法が取られている。この目標とレーダの相対的な運動をレーダの運動により実現するものが合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) である。[1][2]

近年では、SARの応用として干渉型合成開口レーダ (Interferometric SAR: InSAR) が注目されている。この InSAR システムによって得られる位相画像は、同一領域を複数の SAR により観測するか、または1つの SAR により複数回観測することによって得られる位相情報を干渉させて得られる。複数のアンテナまたは複数回の走査による同一領域の観測において、アンテナの位置はわずかに異なっている。そのため、それぞれの SAR により観測される位相情報は、アンテナと観測される地表との距離が異なることにより反射波位相も異なる。その結果、2つの SAR 画像を干渉させると、同位相の箇所では位相は強め合い、逆位相の箇所では弱め合う。つまり、InSAR システムにより得られる位相画像では、干渉縞が得られることになる。実際に、地表の観測においては、起伏が存在するため、干渉縞に歪みが存在することになる。SAR は航空機、人工衛星等に搭載されており、一般的にその軌道情報は既知であるため、InSAR システムにより観測される位相画像より軌道縞を取り除くことは可能であり、その結果得られる干渉縞は地形の起伏のみを表すことになる。現在、InSAR システムにより得られる位相画像は、地形の起伏のみを表した干渉縞として扱うことができ、地球規模の地形の標高モデルの作成が可能であるため、幅広く研究が行われている。[3][4][5]

また、InSAR 技術の応用として差分 InSAR (Differential InSAR: D-InSAR) も注目されている。これは、同一領域を観測することにより地形の標高モデルを作成する InSAR 技術に対して、時期をずらして同一領域を観測することにより、その2時期における地殻変動を観測する技術である。1995年の神戸の震災以降、NASDA を中心として InSAR 技術を用いた地震予知や火山の観測への応用について研究がなされている。[6][7][8]

2.2 高度測定原理

InSAR システムにより得られる位相画像は地形の起伏情報を表している。ここでは、人工衛星に搭載された SAR が2つ存在する場合における位相情報がどのように地形の高度情報を示すのかを簡単に述べる。2つのアンテナを用いた InSAR システムの概略図は図 2.1 である。図 2.1 において S_1 と S_2 は人工衛星に

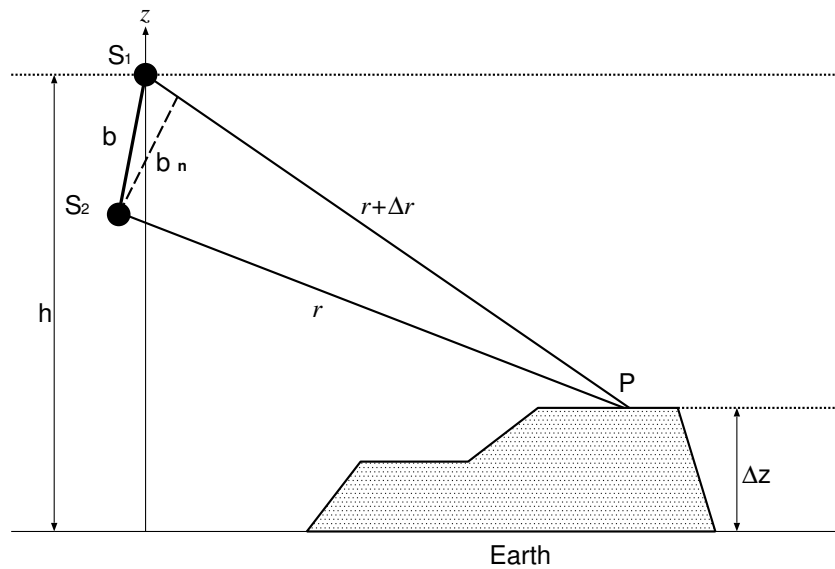


図 2.1: InSAR システムの簡単な概略図: 2つのアンテナが近い距離に人工衛星等に搭載されている。それぞれ同一地点からの反射を受信する。

搭載されたレーダの位置であり、送受信を行うとする。また、これらのレーダは距離 b だけ離れている。さらに、2つのレーダは実効的な基線に沿って b_n だけ離れている。地表の観測点を P とすると、観測衛星 S_1 との距離は r 、観測衛星 S_2 との距離は $r + \Delta r$ である。2つの衛星が観測する位相差 ϕ はレーダの波長 λ および Δr に比例し、以下のように表される。

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.1)$$

ただし、 ϕ_1 、 ϕ_2 はそれぞれ S_1 および S_2 で受信した位相である。また、SAR を搭載した人工衛星の軌道情報から高さ h が求められる。その結果、 P 点の高さ Δz は位相差 ϕ に依存することは明らかであり、また人工衛星と観測点との距離が大きくなれば、位相差 ϕ も大きくなるのが分かる。それゆえ、位相差が $(-\pi, \pi]$ の範囲を越える領域においては観測される値が絶対的な値とはならない。従って、地表の高度情報を表す位相地図を作製するためには絶対的な位相値が必要になってくる。即ち、式 (2.1) から分かるように、原理的な計測精度は伝搬経路の長さに依らず、波長のみで決定される。ただし、InSAR システムにおいて、軌道情報の推定誤差および伝搬経路による空間的攪乱などが誤差要因になる。[9][10][11]

第 3 章： 位相アンラッピング

3.1 位相アンラッピングと位相特異点

InSAR システムにより観測される位相差は $(-\pi, \pi]$ の範囲に折り畳まれており、2 点間の高度差を求めるためには、その 2 点間における絶対的な位相差を求める必要がある。この折り畳まれた位相差を開く操作のことを位相アンラッピングと呼んでいる。InSAR システムにより得られる位相情報に対して、位相アンラッピングという操作を行い、得られる絶対的な位相値を実際の地形の高度に対応させることによりデジタル・エレベーション・マップ (Digital Elevation Map: DEM) が得られる。つまり、InSAR システムを利用した地形の標高モデルの作成のためには位相アンラッピングという操作が必要となってくる。さらに同時に InSAR システムにより観測される位相には特異点と呼ばれる位相アンラッピングを行う上で不整合をもたらす点の存在を考慮しなければならない。実際に、電磁波の空気中における散乱等により伝播の遅延が、観測される位相差に影響することがある。[12]

位相アンラッピングとは一次元的に考えると、観測される位相差により構成される位相画像の各画素がある経路に従って積分していくことに等しい。前述のように、位相特異点の存在を考慮した単純な例を挙げると、図 3.1 のように考えられる。この例では、観測される位相差を $(-0.5, 0.5]$ とした場合における位相アンラッピングが経路に影響することを表している。図 3.1 の A 点および B 点の高度差は、その経路によって異なることが分かる。つまり、位相特異点の周りに積分経路を取った場合には、その積分に矛盾が生じてしまうことになる。そこで、この位相特異点の存在を考慮した位相アンラッピング方法を考える必要がある。

InSAR システムにより観測される位相情報をもとに様々な応用が考えられており、位相アンラッピング方法は数多く提案されているが、位相特異点を考慮するという点において、位相情報を大域的に扱うのか、局所的に扱うのかという、大きく 2 つの方向で研究が進められている。また、位相アンラッピングに直接的に関わってくる位相特異点の影響を低減させ、InSAR システムにより得られる位相画像を修復する研究も行われている。[9][13]

3.2 branch-cut Algorithm

位相アンラッピング方法の中で局所的な方法の代表的なものとして、branch-cut 法というものがある。この方法は、位相値が積分経路によって差異を生じる画素、即ち、位相特異点を検出し、それらの画素とその接続路を避けて位相差を積分することによってアンラップするというものである。このような画素のことを複素積分における留数に習って、Residue ともいう。

3.2.1 原理

branch-cut 法では、Residue をいかに処理するかが重要になっている。Residue は、複素関数論における留数 (Residue) との類似性から命名されたもので、位相勾配の局所周回積分値である。その値は、0、 ± 1 のいずれかであり、 $+1$ になるものを正の Residue、 -1 になるものを負の Residue と呼ぶ。地形の勾配が緩やかで、位相雑音も十分小さければ、その値は必ず 0 になることが分かっている。この場合には、隣り

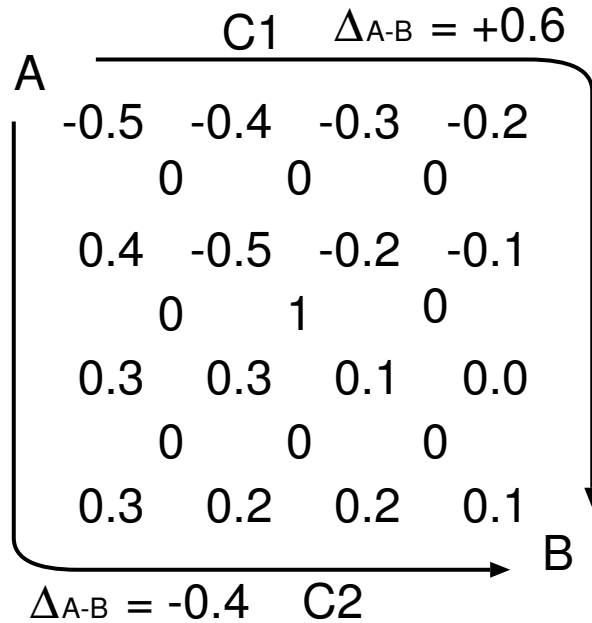


図 3.1: 位相特異点の例: 観測される位相値が $(-0.5, 0.5]$ である場合に A 地点と B 地点の高度差が積分経路により異なる。このような点を位相特異点という。

合う画素の位相差を順に積分していけば、位相アンラッピングを行うことができる。しかし、Residue の値が 0 にならない場合には、位相アンラッピングによって得られる値が積分経路によって異なることになり、一意にアンラップできない。4×4 画素の中央に正の Residue が存在している例を図 3.1 に示す。この図では、各画素の位相が -0.5 以上 0.5 未満になるように正規化しており、隣接する 4 つの画素の中央に Residue の値が記してある。点 A より経路 C1 に沿って点 B まで位相差を積分すると、その結果は $+0.6$ であるが、経路 C2 に沿って積分すると、 -0.4 となり一致しない。また、組み合わせた Residue を結ぶ線分では、アンラッピング結果が不連続となり、高度誤差を生成しやすくなるため、Residue の組み合わせ方も問題となってくる。[14]

そこで branch-cut 法では正負の Residue のペアをつくり、これを結ぶ線分と交わらないような経路で位相差を積分することで、位相アンラッピングを実現している。branch-cut 法による位相アンラッピングの研究は、この正負の Residue のペアの組み合わせ方に注目が集まっている。

3.2.2 結合の長さを最小化する方法

[14] では、Residue のペアの距離をなるべく短くすることにより誤差を低減する方法が考えられている。そのアルゴリズムの手順は以下のような流れになっている。

Step 1 隣接する正負の Residue を組み合わせる。残った Residue は距離の離れたものと仮結合する。

Step 2 仮結合した Residue を一定距離範囲にある結合済みの Residue と組み合わせを入れ替えて再結合し、次式の評価値 g を得る。

$$g = \sum_{n=1}^N L_n \tag{3.1}$$

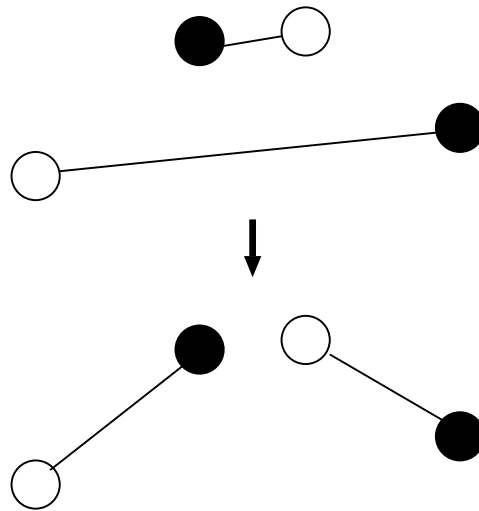


図 3.2: Residue の再結合: 白い丸と黒い丸はそれぞれ正、負の Residue

ただし、 L_n は第 n 番目の結合の長さ、 N は結合の数である。

Step 3 評価値 g が減少しなかったら、入れ替えた組み合わせを元に戻す。

Step 4 すべての仮結合について Step 2,3 を繰り返す。

この手順によって、図 3.2 のように Residue の結合距離の総和を逐次的に減少させることができる。Step 2 で組み合わせの入れ替えを平均 K 回行ったとすると、Step 2 から Step 4 の処理は KN 回の繰り返して実行され、 $K \ll N$ となるように Step 2 を制御することで、比較的少ない演算量で位相アンラッピングを実現できる。

3.2.3 Optimum Branch Cut Algorithm

前節の branch-cut の長さを最小化する方法を用いて、局所的に見つけ出された Branch Cut を大局的に最適化する方法が、Optimum Branch Cut 法である。まず、画像の中心より、1 ピクセルしか離れていない正負の Residue のペアを結合し、次に 2 ピクセル離れた正負の Residue のペアを結合し、次には 3 ピクセルというように、画像中の全ての Residue に関して、この方法で正負の Residue のペアを見つけていく。ただし、この方法を行った結果、まだ Residue が残っている場合には最も近い Residue どうしを結合させる。全ての Residue がペアになると、branch-cut の長さに閾値を設け、最も長い branch-cut のペアである Residue から、前節のように結合の長さの総和を減らすように再結合をしていく。もし、再結合により結合の長さの総和が小さくならない場合は、次に最も長い branch-cut に対して同様に行う。全ての branch-cut が閾値の長さより短くなるまで続けられる。[15][16]

3.2.4 “box” を用いた方法

Goldstein らによるアルゴリズムでは、位相画像より Residue を検出し、その Residue を中心とした “box” を考える。最初は 3×3 ピクセルの検出された Residue 中心の “box” 内に他に Residue が存在しないかを走査する。もし見つければ、その Residue の正負に関わらず、その Residue 間に branch-cut を作

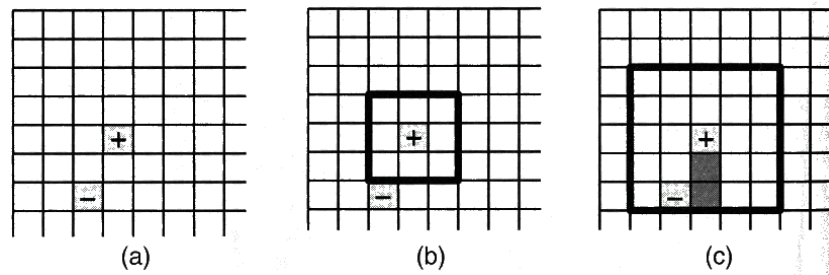


図 3.3: Goldstein のアルゴリズムの処理 (a) 正および負の Residue (b) 走査すべき 3×3 の box (c) 走査すべき 5×5 の box および Residue 間に生成される branch-cut (暗い画素) [17]

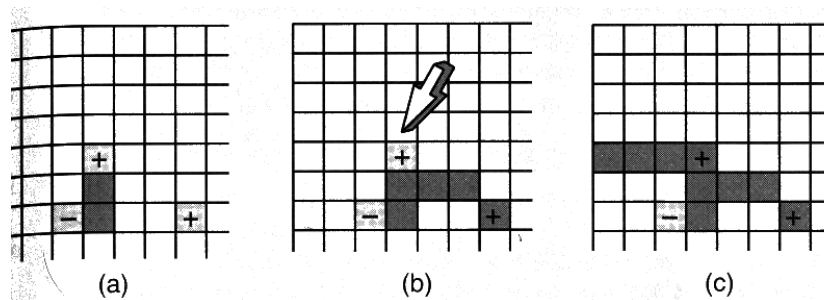


図 3.4: 3 つ目の Residue が存在する場合の Goldstein のアルゴリズムの処理 (a) 右側に新たな Residue への線ができる (b) 矢印で示される Residue に新しい Residue を 2 番目の branch-cut (暗い画素) で結合する (c) (b) において矢印で示される Residue と画像の端を branch-cut で結合する [17]

る。即ち、Residue どうしを結合させる。ここで、“box”内の全ての Residue が正負のバランスを取れば、検出されていない Residue を探すため、位相画像の他の領域を走査し、同様の手順を繰り返す。しかし、“box”内の Residue が正負のバランスを取れていない場合には、図 3.3 のように“box”のサイズを 5×5 ピクセルに拡張し、その中で Residue を検出し、存在すれば branch-cut を作る。この手順は、結合された Residue どうしが正負のバランスを得るか、図 3.4 のように“box”の端が位相画像の端に到達するまで続けられる。即ち、この手法の重要な点は以下ようになる。[17]

1. “box”内を走査し、検出された Residue は、“box”の中心の Residue と branch-cut により結合される。その Residue が既に他の Residue と結合していても同様である。
2. “box”内を走査し、画像の端の画素に到達した場合は、branch-cut は、その端の画素へ繋がれる。これは、正負のバランスが取れていない branch-cut により結合された Residue 周りで積分経路を取れないようにするためである。

従って、結合の長さを最小化する方法とは異なり、正負の Residue の数が等しくない場合においても、branch-cut を生成でき、位相アンラッピングに対してより正しい結論が得られる。

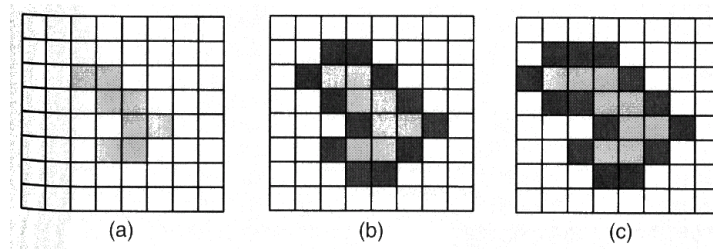


図 3.5: 隣接リスト (a) アンラップされた薄い色の画素 (b) 暗い色の画素をつなぐ隣接リスト (c) リストより 2 行 3 列目の画素が選ばれたときは、図のように隣接リストを更新する [17]

3.2.5 Quality-Guided Path Following Algorithm

Quality-Guided Path Following 法とは、主に前節の Goldstein らによる “box” を用いた branch-cut 法に本質的な部分では類似している。この手法では、各画素の位相値の質の良さというものを、位相情報であったり、位相の微分値の分散であったり、位相値の最大変異であったり様々な要因によって決め、各画素における位相の質を決定する。まず最初に、高品質の画素の位相値が選ばれ、その画素の隣り合う 4 つの画素の位相値がアンラップできるかを考える。その隣接する画素のアンラップされた情報は、“adjoin list” と呼ばれるリストに登録されるが、登録されている中で最も高品質の画素に関しては登録が解除される。次に、最初の高品質の画素であった位相値と、その隣接する画素の中で最も高品質であった画素における 2 つの画素の隣接する 6 つの画素の情報が “adjoin list” に登録される。このように質の高い画素より順にアンラップされ、“adjoin list” に登録され、解除されを繰り返し、すべての画素における位相値がアンラップされるまで続けられる。図 3.5 参照。即ち、ある画素の隣接する画素を質の高い順に位相値をアンラップをすることによって、エラーの伝播を防いでいることになる。[17]

3.3 Global Transform Phase Unwrapping

次に大域的な位相アンラッピング方法の中で広く活用されており、有効な方法を紹介する。Global Transform Phase Unwrapping(GTPU) 法とは、その解法により Least-Squares 法として知られている。本論文において GTPU 法という場合にはこの Least-Squares 法を想定している。GTPU 法とは、理想的に位相アンラッピングが行われた場合を想定することにより、境界条件付きの Poisson 方程式を解くことに結論を帰着させるものである。3.2 節の方法とは異なり、位相画像の Residue の問題を直接を行う必要がないため、演算量が少なく済む。

3.3.1 原理

GTPU 法には主に 2 つの手法があり、それは Unweighted Least-Squares 法と、Weighted Least-Squares 法である。Weighted Least-Squares 法は Unweighted Least-Squares 法を拡張したもので、一般的に GTPU 法を用いる場合には Weighted Least-Squares 法が用いられる。GTPU 法の原理は、折り畳まれた位相画像の x 及び y 方向における 1 次偏微分の値がアンラップされた結果の 1 次偏微分値に等しくなる、もしくは近い値になるということを利用したものである。1 次偏微分の値が近い値でない原因はノイズに起因することが分かっており、1 次偏微分の差を最小化することによりノイズによる影響を低減させ、位相ア

ンラッピング結果が得られる。実際には以下のような離散化された Poisson 方程式における Neumann の境界条件を解くことに帰着する。[15]

$$(\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}) + (\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}) = \rho_{i,j} \quad (3.2)$$

$$\rho_{i,j} = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y) \quad (3.3)$$

位相画像サイズの i, j に関しては以下の通り

$$i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3.4)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.5)$$

境界条件は以下のようになる。

$$\Delta_{-1,j}^x = \Delta_{M-1,j}^x = 0 \quad j = 0, \dots, N-1 \quad (3.6)$$

$$\Delta_{i,-1}^y = \Delta_{i,N-1}^y = 0 \quad i = 0, \dots, M-1 \quad (3.7)$$

Unweighted Least-Squares 法には具体的には 2 つの手法がある。それは、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) による方法と、離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform: DCT) による方法である。以下、この 2 つの方法の具体的なアンラッピング手法を紹介する。

FFT-based Methods と DCT-based Methods

FFT を用いた位相アンラッピングアルゴリズムと DCT を用いた位相アンラッピングアルゴリズムとは、FFT と DCT との違いにより類似した変換にも関わらず、異なった演算が必要である。まず、FFT を用いたアルゴリズムについて紹介する。サイズ $(M+1) \times (N+1)$ の画像の各画素の位相値を $\psi_{i,j}$ とし、求められるアンラップされた絶対的な位相値を $\phi_{i,j}$ とする。ここで、図 3.6 のように位相値 $\psi_{i,j}$ を正反射により拡張した $\tilde{\psi}_{i,j}$ を求める。ただし、 $\psi_{i,j}$ に相当する画像は左上の区画である。こうすることにより、GTPU 法における境界条件の考慮が必要なくなる。また、 x, y 方向の位相の変異を表す $\Delta_{i,j}^x$ 及び $\Delta_{i,j}^y$ は次のように定義される。

$$\Delta_{i,j}^x = \mathcal{W}\{\tilde{\psi}_{i+1,j} - \tilde{\psi}_{i,j}\} \quad (3.8)$$

$$\Delta_{i,j}^y = \mathcal{W}\{\tilde{\psi}_{i,j+1} - \tilde{\psi}_{i,j}\} \quad (3.9)$$

ただし、 \mathcal{W} はラッピング演算子である。式 (3.2) を正反射により拡張された $\tilde{\psi}_{i,j}$ に適応することによって、以下の式を解くことが、位相アンラッピングを実現することになる。

$$\Phi_{m,n} = \frac{P_{mn}}{2 \cos(\pi m/M) + 2 \cos(\pi n/N) - 4} \quad (3.10)$$

ただし、 m, n は以下を満たす。

$$i = 0, 1, 2, \dots, 2M-1 \quad (3.11)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, 2N-1 \quad (3.12)$$

ただし、 $\Phi_{m,n}$ は $\tilde{\phi}_{i,j}$ をフーリエ変換したものであり、 $P_{m,n}$ は $\rho_{i,j}$ を正反射により拡張したときの $\Delta_{i,j}^x$ 及び $\Delta_{i,j}^y$ を式 (3.4) に従って求められた $\tilde{\rho}_{i,j}$ をフーリエ変換したものである。以上より、求められた $\Phi_{m,n}$

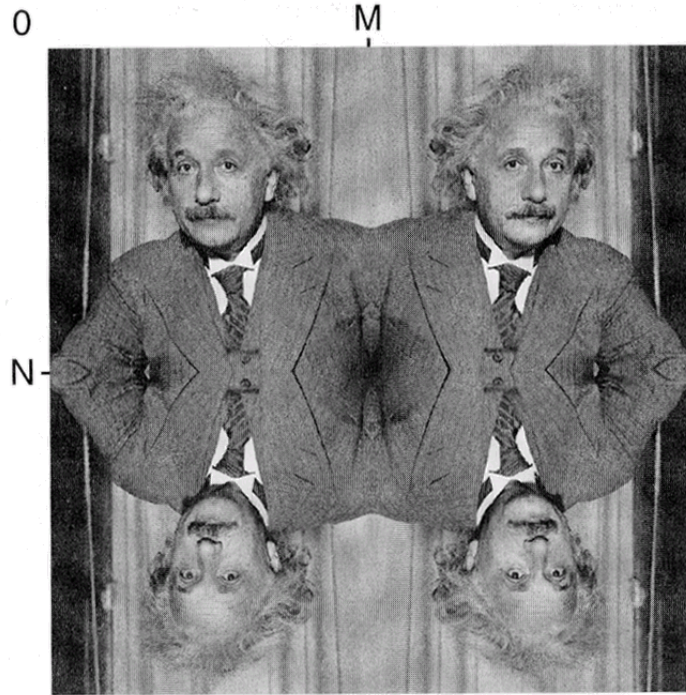


図 3.6: $0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq N$ の範囲に定義される関数 $f_{i,j}$ の正反射の例。まず最初に $i = M$ の線に対して関数を反射させ、次に $j = N$ の線に対して反射させる。[17]

を逆 FFT することによって得られる $\tilde{\phi}_{i,j}$ の $(0 \leq i \leq M)$ 、 $(0 \leq j \leq N)$ の部分が、求めたいアンラップされた位相値 $\phi_{i,j}$ である。[17]

次に、DCT を用いたアルゴリズムを紹介するが、DCT の性質により、折り畳まれた位相画像を正反射せずに DCT を行い、以下の式により求められる $\hat{\phi}_{i,j}$ に逆 DCT を施すことで、求めたいアンラップされた位相値 $\phi_{i,j}$ が得られる。

$$\hat{\phi}_{i,j} = \frac{\hat{\rho}_{i,j}}{2 \cos(\pi i/M) + 2 \cos(\pi j/N) - 4} \quad (3.13)$$

以上のような計算を行うことにより、理論的には折り畳まれた位相画像をアンラッピングすることができる。[15][17]

3.3.2 Weighted Least-Squares Algorithm

Least-Squares 法は 3.2 節の branch-cut 法などの Residue を直接扱う方法とは異なり、直接結果を求めるため局所的なエラーが位相画像全体に広がる可能性を否定できない。そのため、位相画像中においてエラーを起こしにくいと判断できる場所を優先的に位相アンラッピングを行う方法がある。これは、Weighted Least-Squares 法と言われ、位相画像に対して重み付けを行うというものである。

代表的な重み付けの方法としては、コヒーレンスを用いるものがある。コヒーレンスとは、InSAR 位相画像に関して、その位相値の信頼度を測る指標と考えることができる。そこで、コヒーレンス自体を重み付けの係数として各画素の位相値に掛け合わせることで重み付けを行い、位相アンラッピング結果の正

確さを向上させることができる。また、コヒーレンスの大きさによって閾値を定め、ある画素におけるコヒーレンスがその閾値を越えている場合には、もとの位相値を用い、閾値以下の画素における位相値にはコヒーレンスを重み付け係数として用いるという方法も存在する。[15][18]

Synthesis Algorithm

3.2 節で述べた通り、Residue を避けて位相アンラッピングを行う branch-cut 法では、Residue 及び branch-cut において、アンラッピングが行われませんが、局所的な正確さは保たれている。また、本節の Least-Squares 法では、局所的なエラーが位相アンラッピング結果全体に影響を及ぼすものの、位相画像全体において結果が得られるという利点がある。そこで、[19] では、Synthesis Algorithm というものが提案されている。これは、branch-cut 法により重み付けをした、Weighted Least-Squares 法ということができる。

この方法は、まず 3.2 節で branch-cut の作り方に関して複数述べたように、何れかの方法により branch-cut を見つけ出すことから始まる。そして、見つけられた branch-cut 及び Residue の部分には重み付けを 0 として、残りの部分にはコヒーレンスを重み付け係数として、位相値に掛け合わせる。最後に、本節で述べたように、GTPU 法によって位相アンラッピングを行う。この方法は、branch-cut 法の正確さに大きく影響を受けることが明らかであるが、[19] では、位相アンラッピング手法として効果的であることが示されている。ただし、GTPU 法による演算の部分は本節のような計算法を用いることになる。

Recursive Transform-based Phase Unwrapping

GTPU 法による位相アンラッピングでは、基本的には Residue を考慮せずに行われる。そのため、Weighted Least-Squares 法のようにフィルタを用いる方法が考えられているが、得られた DEM を観測される位相情報のように折り畳むことによって、DEM の歪みを計算し、その歪みを小さくするように GTPU 法を繰り返す方法がある [20]。この方法は Recursive Transform-based Phase Unwrapping(RTPU) と呼ばれており、求められる DEM は GTPU 法による位相アンラッピングを適当な回数繰り返すことによって、観測される位相情報を忠実に再現することが可能である。具体的には、観測される位相画像に対して干渉位相強調フィルタである Goldstein-Werner フィルタや boxcar フィルタ等を適用し、GTPU による位相アンラッピングを行う。その結果得られた DEM を再度折り畳み、観測位相画像との誤差を取得する。その誤差に対して、さらに GTPU による位相アンラッピングを行う。このように、適切な回数だけ GTPU 法を適用することにより、観測位相画像との誤差を十分低減することが可能であり、得られる DEM の精度は非常に高いものとなる。しかしながら、GTPU 法の利点は位相アンラッピングの実行時間が短いことであるが、RTPU 法の場合は非常に大きくなるという欠点を持つ。

3.4 Region Growing Algorithm

Region Growing 法とは、3.2.5 節の Quality-Guided Path Following 法と類似した位相アンラッピング法の一つである。基本的な方法としては、branch-cut 法のように画素間を積分することによって、位相アンラッピングを行うため直感的に分かりやすい方法であり、アンラッピングにおいて、各画素の信頼性を評価するため、通常の branch-cut 法よりも精度が高い結果が得られる。[21]

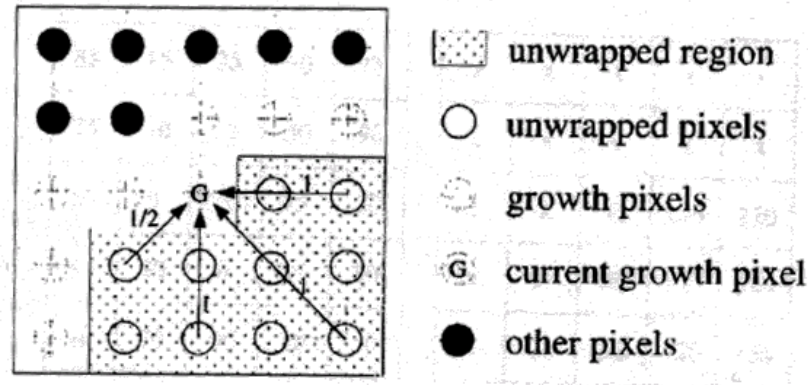


図 3.7: 位相の積分経路を予想した時の Growth 画素とその近傍画素 [21]

3.4.1 原理

3.2 節で述べた通り、位相アンラッピング結果の精度は積分経路の選び方に左右される。また、信頼性の低い画素よりアンラッピングを行うと、そこで生じるエラーが画像中の他の部分に伝播してしまう。そこで、Region Growing 法は以下のような手順により位相アンラッピングを実現する。

1. アンラッピングは複数の”seed”より同時に行われる。”seed”とは局所的に正確さの高い領域である。
2. それぞれの画素はアンラップされた隣接する画素によりアンラップされる。ただし、隣り合う画素間で位相差が π より大きいときのみ結果が有効となる。
3. 各画素は可能な限り全ての方向からの情報をもとにアンラップされる。これにより、エラーによる影響を小さくすることができる。
4. 位相値のアンラッピング結果の一貫性に基づく信頼度を調べ、アンラッピングによって得られた位相値を改善する。
5. 信頼度の許容範囲を徐々に広くしていくことで、アンラッピング結果の一貫性を保ちながら、可能な限りの領域を位相アンラッピングができるようになる。
6. アンラップされた領域が大きくなっていくことで、領域どうしが繋がる場合には、一貫性を調べることにより、可能ならば領域を結合する。

信頼度とは、どれ程度位相アンラッピング結果が正確であるかを表すものである。また、アンラッピングを始める最初の画素は、位相画像中のエラーを起こしにくい領域から選ばれるため、アンラッピングによって誤った結果を得てしまいそうな領域をアンラップするときには、既に堅実な結果を参考にしてアンラップできるので、精度は高くなる。

Growth pixels のアンラップ法

seed よりアンラッピングが行われて、アンラップされた位相で構成される領域を形成する。この領域を囲む画素の中で、次にアンラップされる画素のことを”Growth pixel”という。図 3.7 のように”G”で表されている Growth pixel はひとつ以上方向より、アンラッピング結果の正確さを考慮に入れてアンラップされる。この Growth pixel に隣接するアンラッピングされた画素に対して直線上に存在するアンラップ

された画素を結んだ線を予測線という。Region Growing 法は具体的には以下のような過程を経る。ただし、Growth pixel に隣接するアンラップされた画素の数を N_u 、そのアンラップされた k 番目の画素より考えられる Growth pixel の予測される位相値 ϕ_k^p とする。図 3.7 は $N_u = 4$ の時の例である。

1. もし、Growth pixel に隣接するアンラップされた画素が、その方向に 2 つ画素を持っているとすると

$$\phi_k^p = 2\phi[k] - \phi[k'] \quad (3.14)$$

ただし、 $\phi[k']$ は Growth pixel に隣接するアンラップされた画素の隣の画素の位相値を表す。即ち、予測線上に 2 つ以上画素がある場合は式 (3.14) が適用される。

2. それ以外の場合には、以下ようになる。

$$\phi_k^p = \phi[k] \quad (3.15)$$

従って、Growth pixel のアンラッピング結果 ϕ^p は、上記のように求められた ϕ_k^p に重み付けをした次の式のように求められる。

$$\phi^p = \left(\sum_{k=1}^{N_u} w_k \phi_k^p \right) / \left(\sum_{k=1}^{N_u} w_k \right) \quad (3.16)$$

ただし、重み付け係数 w_k は、1 の場合には 1 を、2 の場合には 0.5 を用いるものとする。図 3.7 における予測線の横にかかれた数字が重み付け係数である。

位相アンラッピングでは、折り畳まれた位相値 ϕ_w に主値 2π の整数倍を加減することにより、アンラッピング結果 ϕ_u が求められる。Growth pixel における折り畳まれた位相値を ϕ_w とすると、

$$\phi_u = \phi_w + 2\pi m \quad (3.17)$$

のように ϕ^p を改善したアンラッピング結果 ϕ_u が得られる。また、 m は次のように求められる。

$$m = \text{nint} \left(\frac{\phi^p - \phi_w}{2\pi} \right) \quad (3.18)$$

ただし、 $\text{nint}(x)$ は x に最も近い整数値を返す関数だとする。しかし、アンラッピングによる結果は、さらに、Growth pixel の位相アンラッピング結果が、その画素に隣接するアンラップされた位相値のうちひとつ以上と π 以上の差がなければ有効にならない。こうすることにより、位相変異が大きい場所においても正確に位相アンラッピングが実現できる。また、アンラッピング信頼度というもの定義されており、このテストにも通らなければならないのだが、正確にアンラッピング可能な領域より少しずつ行われるため、このアンラッピング信頼度のテストは徐々に緩和されていく。従って、位相画像の広い範囲がアンラッピング可能となる。

3.4.2 Region Growing Least Squares Algorithm

Region Growing Least Squares 法とは、位相アンラッピングを行う領域を GTPU 法で求めるというものである。正確さが保証されている領域が、最初の位相アンラッピングの領域となる場所は、Region Growing 法と等しいが、その局所的な領域では GTPU 法により位相アンラッピングを行う。これにより、Region Growing 法の精度の良さと、GTPU 法の強固さを持ち合わせる方法となる。

Region Growing Least Squares 法では、まず最初にコヒーレンスが低い領域を検出し、見つけられると最も低い優先度を与える。次に最もコヒーレンスが高い領域の優先度を最大にしというように、画像全

体を領域分割し、それぞれの領域の優先度を決定する。そして、優先度が最も高い領域より、GTPU 法によって位相アンラッピングを行う。この方法により、優先度が低い領域においても、優先度の高い領域の精度の高い位相アンラッピング結果を境界条件として GTPU 法を解くことができるので、結果の正確さは大きくなるのが自明である。[22]

3.5 利点と欠点

3.5.1 branch-cut Algorithm の特徴

branch-cut Algorithm は各画素ごとに 1 次元的に位相アンラッピングを行うため、直感的にも分かりやすく、Residue が少ない画像においては、高い精度の結果を得ることができる。しかしながら、InSAR システムによる画像のような Residue の数が多い画像に関しては、正負の Residue を結合し branch-cut を作るため、演算量が膨大になり、また Residue 周辺では位相アンラッピング結果が得られないという欠点もある。さらに、正負の Residue の数が等しくない場合には、必ずどこかの画素周囲の積分経路を取ると位相アンラッピング結果が正確にならないことは明確である。3.2.4 節のように、正負の Residue のバランスが取れない場合に、画像の端と Branch Cut を作成する方法は、正負の Residue のバランスが取れない場合のひとつの解法であるが、branch-cut が無駄に長くなってしまい、位相アンラッピング結果が得られない領域を生成するという欠点も存在する。Residue を直接処理する Goldstein らによる branch-cut 法以外にも 3.2.5 節の方法が存在する。これは、各画素のうち最も質の高い画素からアンラップされるので、得られる結果の正確さは大きく、Residue を直接扱うことはないので、3.2.4 節の方法よりも成功しやすいかもしれない。しかし、位相画像においてどのように各画素の質を求めるといふ問題があり、正確に各画素の質を表せなければ用いることができないという欠点を持つ。[14][15][17]

3.5.2 GTPU 法の特徴

また、GTPU 法では、Residue を直接処理して計算することはないため、その手順は直感的に分かりにくい部分はあるが、branch-cut 法に対して演算量が少なく、位相アンラッピング結果が比較的短い時間で得られる。しかし、位相画像にはアンラッピングによりエラーを起こしてしまう領域が存在しており、位相アンラッピングの精度を高くするためには、そういう領域を考慮に入れずに行うわけにはいかない。Unweighted Least-Squares 法では、そういう画素を考慮せずに位相アンラッピングを行うため、局所的に生じたエラーが結果には大局的に影響を及ぼされていることが分かっている [15]。そこで、3.3.2 節のように、各画素に重み付けを行うことにより、局所的エラーの伝播を防ぐことができる。GTPU 法の利点は、位相画像のどの部分においても誤差が存在しているとしても、結果が得られるという強固さであり、逆に局所的に防ぐことができるはずのエラーが結果全体に反映されやすい欠点を持っているということが言える。[17] しかし、位相アンラッピングの結果がどれだけ短い時間で得られるかということも位相アンラッピング手法のひとつの評価となり、[23] では、GTPU 法の原理を応用した方法を用いることによって短時間で結果が得られる速い位相アンラッピング手法が提案されている。

3.5.3 比較

[15] では、 150×150 ピクセルの位相画像、 256×256 ピクセルの位相画像及び、 256×256 ピクセルの折り畳まれた部分の密度が大きくコヒーレンスが低い位相画像の 3 種類の画像において、様々な手法を比較している。その結果分かることは、画像サイズが小さく、その結果 Residue の数が少ない場合には、

表 3.1: 1024 × 1024 のピクセルサイズの画像を IBM RS/6000 workstation にて位相アンラッピングを行った場合に要するメモリ及び平均実行時間

アルゴリズム	メモリ必要量	実行時間
FFT/DCT	1	23 秒
Goldstein(Box)	3	30 秒
Quality-Guided	4	3 分

branch-cut 法の利点が大きく出てくるが、画像サイズが大きくなると、確かに branch-cut 法による結果は変わらず比較的正確ではあるが、GTPU 法もまた同程度の正確さを与えるだけの方法となる。branch-cut の長さの総和を最小化する方法での正確さと、GTPU 法での正確さが、それほど大差ない場合には、処理の時間を考慮すると GTPU 法の方が活用する利点があるであろう。

また、[17] では、3.2.4 節の Goldstein らによる方法と、3.2.5 節の方法、及び 3.3.1 節の FFT と DCT による方法を比較しており、IBM RS/6000 workstation において 1024 × 1024 の画像を用いた場合のメモリの必要量と処理時間は Table 3.1 のようになり、アンラッピング結果の正確さとは逆に FFT/DCT による方法が理想的であることが分かる。

Region Growing 法は [21] によると、branch-cut 法及び GTPU 法よりもコヒーレンスが低い領域において位相アンラッピングが成功するということが分かった。しかし、本質的な位相アンラッピング手法として branch-cut 法のように画素レベルの位相アンラッピングを行うため、アンラップできない領域が必ず存在してしまう。このような領域は Residue の存在が大きく関わってくる。そのため、InSAR システムにおいて位相と同時に観測される振幅情報を考慮し、位相情報を区分化することによって位相アンラッピングの成果を得る研究が行われている [24]。

第 4 章： 四基準点法

4.1 位相アンラッピングと補正

位相アンラッピング方法は前述の通り、大きく大域的な方法と局所的な方法に分類される。その大きな違いは位相特異点の扱い方にある。局所的な方法では、branch-cut Algorithm のように、一般的に位相特異点を避けた積分経路を設定することにより位相アンラッピングを行う。その結果、不整合な画素を除いたことが、結果として得られる DEM の精度を向上させる。即ち、局所的な方法においては、位相アンラッピングにおいて解が得られる領域では比較的正確な地形の高度を求めることができる。しかしながら、位相特異点を避けることにより、位相特異点およびその周囲における画素での正確な高度は求めることができない。そのため、ある領域では正確な位相アンラッピングの解が得られるが、ある領域では解さえも求められないということになる。一方で、大域的な方法では、直接的には位相特異点を考慮しない。その結果、解が求められない領域は存在せず、ある程度正確な地形の標高モデルの作成が可能である。その反面、位相特異点という不整合をもたらす画素について考慮しないことにより、FFT や DCT による周波数領域での位相情報は既に歪みが生じていると考えられる。解法上、歪みは低減され得るが、完全に取り除くことは困難であろう。では、実際に InSAR システムを用いた地形の高度情報を取得する場合に、その応用として有用であるのは大域的な方法または局所的な方法のどちらであるのか。

InSAR システムにおいて位相特異点が完全に取り除かれた位相情報を得ることは非常に困難だと思われる。それはレーダの特徴や、改善されたレーダが開発されたとしても、観測衛星の打ち上げ等、考慮すべき問題が多々ある。そのため、現在の InSAR システムを用いる上での応用として、位相アンラッピング方法は局所的であるか大域的であるかを決めなければならない。そこで、重要になるのは、アルゴリズムの実行時間、要するメモリ、そして広範囲での解可能であるかどうかだと思われる。即ち、局所的な正確さよりも全体的に解が得られる大域的な方法が望ましいだろう。しかし、大域的な方法で最も広く用いられている GTPU 法では、局所的な方法と比較して精度の面で問題があることは否めない。そこで、GTPU 法による位相アンラッピングを有効的に活用するためには、GTPU 法により得られた DEM を適当に補正し、精度向上を目指す必要がある。

四基準点法とは、GTPU 法における結果の DEM を補正する方法であり、GTPU 法による位相アンラッピングの応用のための精度向上を目指す。GTPU 法では、式 (3.4) を参照すれば分かる通り、その解法上 0 次微分成分及び 1 次微分成分の欠落が考えられる。実際に GTPU 法により求めた DEM に 0 次微分成分及び 1 次微分成分が存在しないわけではない。しかし、計算過程において観測される位相情報の 0 次微分成分及び 1 次微分成分が適切に用いられていないのは確かである。従って、GTPU 法により求められた DEM における 0 次微分成分及び 1 次微分成分は適切に求められたものではないということが推定される。そこで、高度情報が正確に分かる基準点を設け、その基準点を用いることにより計算上求められてしまった 0 次微分成分及び 1 次微分成分を適切に推定することで、DEM を補正できると考えられる。

では、どのように基準点を選べば良いのだろうか。GTPU 法において注目すべき式は式 (3.4) である。この式を参照すれば分かる通り、 $\rho_{i,j}$ は観測される位相画像の軸方向への 2 次微分値により構成されている。便宜上、画像の軸を x 軸および y 軸とすると、欠落する情報は x 軸および y 軸に対して 1 次元的な変化をしていることが推定される。2 次元の面として推定すべき適切な 0 次微分成分及び 1 次微分成分を考えると、上記の条件を満たすためには任意方向に傾きを持った平面が考えられる。しかし、軸方向に 1 次元的に変化しているだけで、それ以外の方向に対して 1 次元的に変化しているかどうかは観測する地形や

その位相情報に依存する。そのため、推定すべき面は任意方向への平面ではなく、軸方向に1次元的な変化をしている曲面と考えることが妥当であると思われる。

4.2 四基準点法の概要

地球規模の地形の標高モデル作成は多くの応用が考えられ、実現すべき課題である。また、位相アンラッピングにより地形の高度情報を取得する場合には、全体的に解が得られる大域的な方法が、応用を考える上で理想的である。しかし前述のように、大域的な位相アンラッピング法として広く活用されているGTPU法では、計算時間、メモリの必要量、全体で解が求められる等の利点の反面、その精度に問題がある。そこで、結果として得られるDEMを適切に補正できれば理想的だと考えられる。

GTPU法によるDEM作成は、位相画像全体に対する解が高速に得られるという利点を持つ。しかしながら、GTPU法では、前提として観測されるInSAR位相画像と理想的にアンラップされた位相画像との間で1次偏微分値が等しいという点から発している。その結果、定数成分、即ち0次微分成分は考慮されない。また、式(3.4)を参照すれば分かる通り、帰着したPoisson方程式では、既知のInSAR位相画像の2次微分値を用いる。そのため、実際に観測される位相画像の0次微分成分及び1次微分成分に対しては、解法上考慮する術が無く、欠如が生じることは否めない。

実際にInSARシステムを用いた計測において、GTPUで求められたDEMのある点を基準とし、その点に対応する地点の実際の高度を何らかの方法で計測し高さ方向にシフトして0次微分成分を決定する。また、基準点を2点設けることで、これに加えてDEMの傾きを推定して補正する方法も考えられる。位相アンラッピングにより得られた位相値が実際の地形の高度とどう関係しているのかを求めることは実計測において非常に重要なことであり、基準点を多くとも2点取ることによって実現される。また、この補正方法は0次微分成分及び1次微分成分に対する補正を行えているように見える。しかし、実際に式(3.4)を参照すれば分かる通り、2次元位相情報、即ち位相画像における2つの座標軸の方向に1次微分成分が欠落していることが分かる。つまり、2点の基準点のみによる補正ではGTPU法によるDEMは適切に補正できないということが言える。

そこで筆者は四基準点法を提案する。位相画像の座標軸を x 軸、 y 軸と設定すると、この方法は位相画像の x 軸方向及び y 軸方向の1次微分成分が欠落しているという点に注目している。即ち、基準点として、ある1点を基準に x 軸方向に平行に1点、 y 軸方向に1点の基準点を選ぶ。さらに、推定すべき面は曲面であることを想定しているため、以上の3点以外に任意の場所に1点基準点を選ぶ。これにより、求めたいDEMにおける欠落するはずの0次微分成分及び1次微分成分で形成される曲面 $z[\text{rad}]$ は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} z &= (Ax + B)(Cy + D) \\ &= axy + bx + cy + d \end{aligned} \quad (4.1)$$

このような0次及び1次の曲面(高さ) z をGTPU結果が持つように補正する。例えば、 $x = x_0$ に固定したとき $z = (Ax_0 + B)(Cy + D)$ となり、 y 方向に1次微分成分の補正が行われる。 x 方向にも同様である。即ち、求めるべき未知数は4つである。従って、実際の地形において基準となる点を4点設け、その4点より求められる式(4.1)の係数 a 、 b 、 c 、 d で表される面 z がGTPUにより欠落する情報である。この補正方法を四基準点法と呼ぶことにする。また、この曲面 z を補正面と呼ぶことにする。

実際の計測において、四基準点法を用いた補正は以下のような手順になると考えられる。まず、InSARシステムにおいて観測した領域において、基準点と設定できる場所の高度を実地形において何らかの方法で計算する。観測した位相画像をもとにGTPU法で位相アンラッピングを行う。基準点の高度情報をもと

に補正面を求める。最後に GTPU 法により得られた DEM の 0 次微分成分および 1 次微分成分を補正面に置き換える。このようにして正確な 0 次および 1 次微分成分を持った DEM を作成することができる。

4.3 基準点と補正面

四基準点法による GTPU 法により得られる DEM の補正が有効であると仮定した場合に、重要になるのは基準点の選び方である。補正面の形状は前節の z のように表されるため、少なくとも 4 点において正確な高度情報が必要になるが、四基準点法に適した基準点が 4 点以上ある場合にはその全てを考慮した方がより精度の高い結果を得られるのではないだろうか。本論文では、GTPU 法により生じる歪みを四基準点法で補正できるのかという点を中心に補正面の形状の違いによる補正精度の変化、適切な基準点数、基準点の選び方に関して実験を進めていく。

第 5 章 : 四基準点法の検証

5.1 実験における諸設定

実験では図 5.1 の 2 枚の 256×256 ピクセルサイズの InSAR 位相画像を用いた。また位相アンラッピングの方法には GTPU 法を用い、得られた DEM に対する補正を行うことにした。GTPU 法による結果は図 5.2 及び図 5.3 である。補正は四基準点法を用いる他にそれより基準点が少ない 4 種類の補正面を用いることで比較した。また、本論文が提案する補正を行うためには実際の地形の形状を数点で測定する必要がある。即ち、数点で正解を知っている必要がある。RTPU 法 [20] では繰り返し DEM を求めることで細部の誤差を低減し、1 次微分成分も正確に得られる。そこで、本論文では RTPU 法により得られる DEM を正解として用いた。図 5.4 及び図 5.5 はそれぞれ図 5.1 の 2 枚の位相画像に対して RTPU を行い求められた DEM 及び、それを再度折り畳んだ画像である。ただし、GTPU 法及び RTPU 法で用いた位相画像には、Boxcar フィルタにより位相強調が施されている。

また、補正により正解に対してどの程度近くなっているのかを示すためにピーク値による SN 比 (Peak Signal to Noise Ratio : PSNR) を以下のように定義して用いた。

$$PSNR = 10 \log \frac{(\text{Max}\{\phi_{i,j}^{\text{REF}}\}_{pp})^2}{MSE} \quad (5.1)$$

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i,j} (\phi_{i,j}^{\text{REF}} - \hat{\phi}_{i,j}^U)^2 \quad (5.2)$$

ただし、 MSE とは平均二乗誤差のことであり $\phi_{i,j}^{\text{REF}}$ は正解の DEM、 $\hat{\phi}^U$ は位相アンラッピングによって求められた DEM を示す。さらに、 $\{\cdot\}_{pp}$ は尖頭値を求めるものである。画像のサイズは $M \times N$ である。この $PSNR$ 値が大きいほど正解の DEM と求められた DEM とが近いことになる。

5.2 四基準点法の理論的検証

まず、四基準点法による DEM の補正法が理論的に有効であるのかを確かめるために、基準点数が 1 点、2 点、3 点、4 点の場合において推定される補正面を想定して正解の DEM から最小二乗法を用いて求めた。即ち、まず正解に対する式 (4.1) の変数を推定し曲面を求め、次に GTPU 結果の 0 次微分成分及び 1 次微分成分から推定される面を求め、先に抽出した正解の面と置換することで GTPU 結果の歪んだ 0 次

表 5.1: 式 (4.1) に基づいた基準点数と補正面との関係

points	Compensation surface	Parameter Condition
1 点	水平面	$a = b = c = 0$
2 点	x 方向斜面 (平面)	$a = c = 0$
	y 方向斜面 (平面)	$a = b = 0$
3 点	任意方向斜面 (平面)	$a = 0$
4 点	式 (4.1) による曲面	

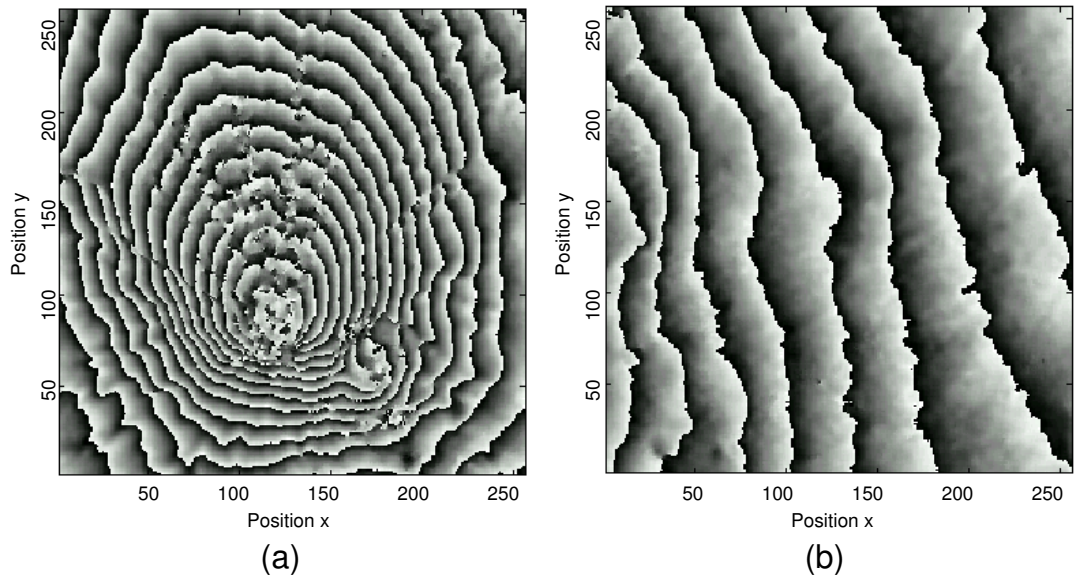


図 5.1: InSAR 位相画像: (a) 山頂付近 (b) 斜面

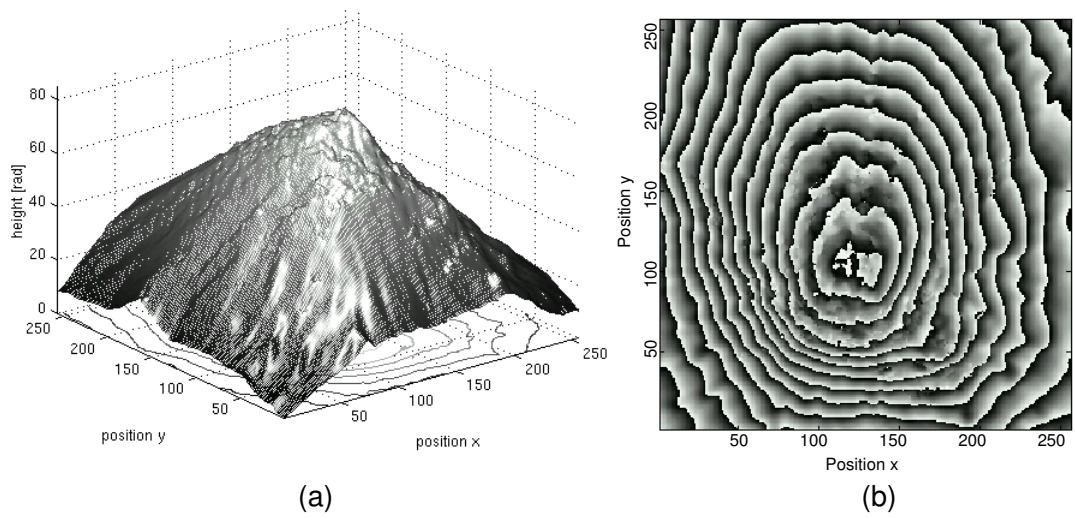


図 5.2: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた GTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

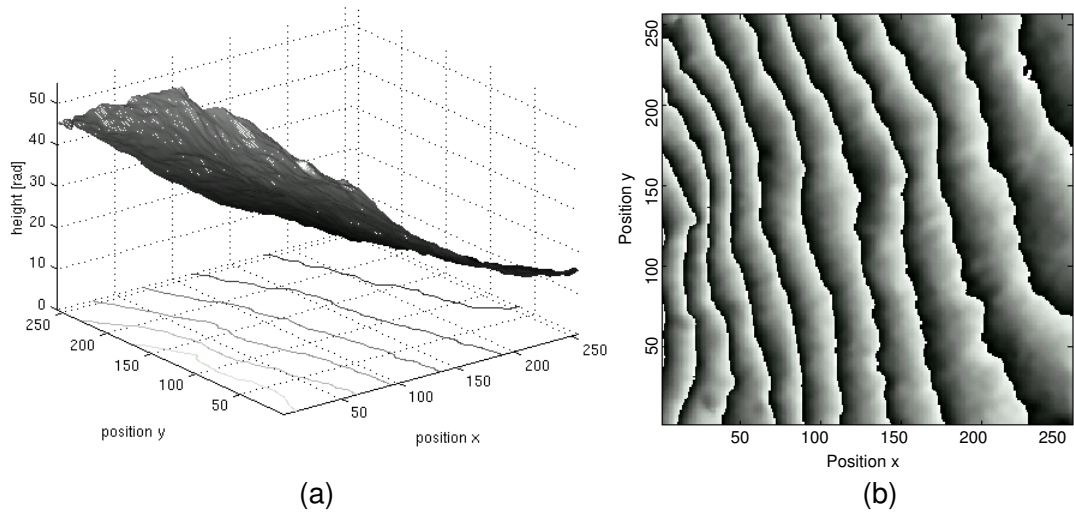


図 5.3: 斜面の InSAR 位相画像を用いた GTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

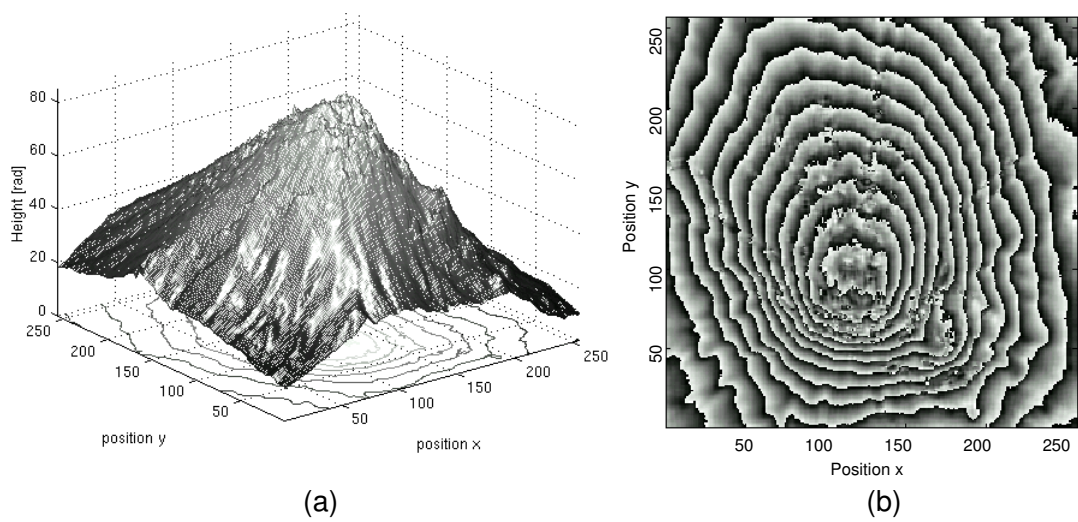


図 5.4: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた RTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

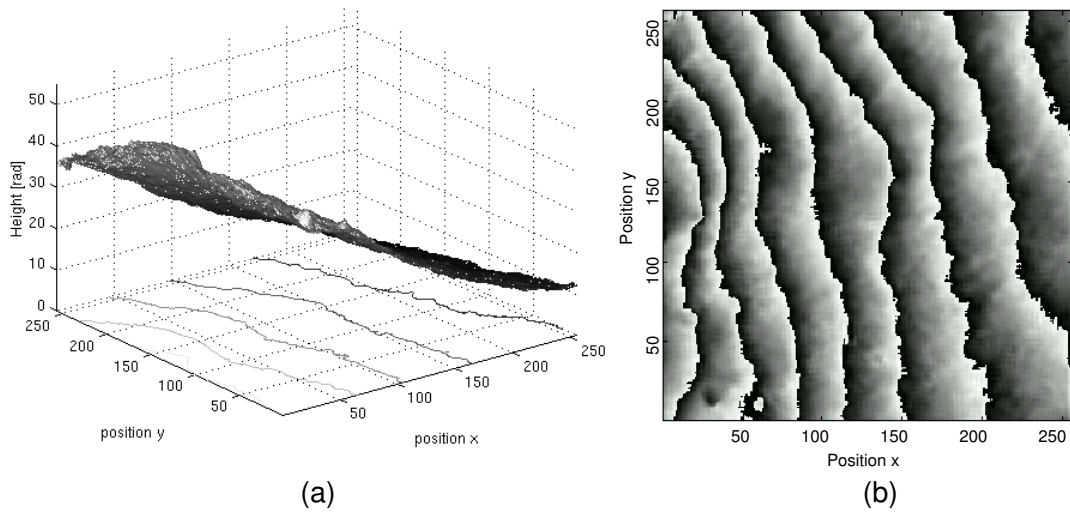


図 5.5: 斜面の InSAR 位相画像を用いた RTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

表 5.2: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係

parameters	1	2(x direction)	2(y direction)	3	4
PSNR [dB]	16.2	27.6	20.5	29.2	33.8

微分成分及び 1 次微分成分を正確なものとして行うことができる。ここでは全ての画素を利用した。この方法を四変数法と呼ぶことにする。実験の手順は以下のようになる。

1. 0 次微分成分及び 1 次微分成分の抽出
 - (a) 正解 DEM より 0 次微分成分及び 1 次微分成分が構成する曲面を求める
 - (b) GTPU 結果より 0 次微分成分及び 1 次微分成分が構成する曲面を求める
2. GTPU 結果より (b) の曲面を差し引く
3. 2. の結果に (a) で求めた曲面を補正曲面として付加する

このとき基準点数と補正面及び変数に課せられる条件との対応を表 5.1 に示す。

5.2.1 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた実験

図 5.1(a) の山頂付近の InSAR 位相画像を用いて GTPU により得られた DEM を基準点の数に対応する面を推定し補正を行った。補正面を求めるための変数が 1 変数、 x 軸方向に傾きを持つように 2 変数、 y 軸方向に傾きを持つように 2 変数、3 変数、4 変数とした時の結果はそれぞれ図 5.6、図 5.7、図 5.8、図 5.9、図 5.10 のようになった。この 5 つの図の折り畳まれた画像と図 5.1(a) の位相画像を比較すると、4 変数による補正の場合が最も元の位相画像に対して忠実な DEM を生成できている。さらに、5 つの図の DEM と図 5.4(a) の正解 DEM とを比較すると、やはり 4 変数による補正の場合が最も良い。

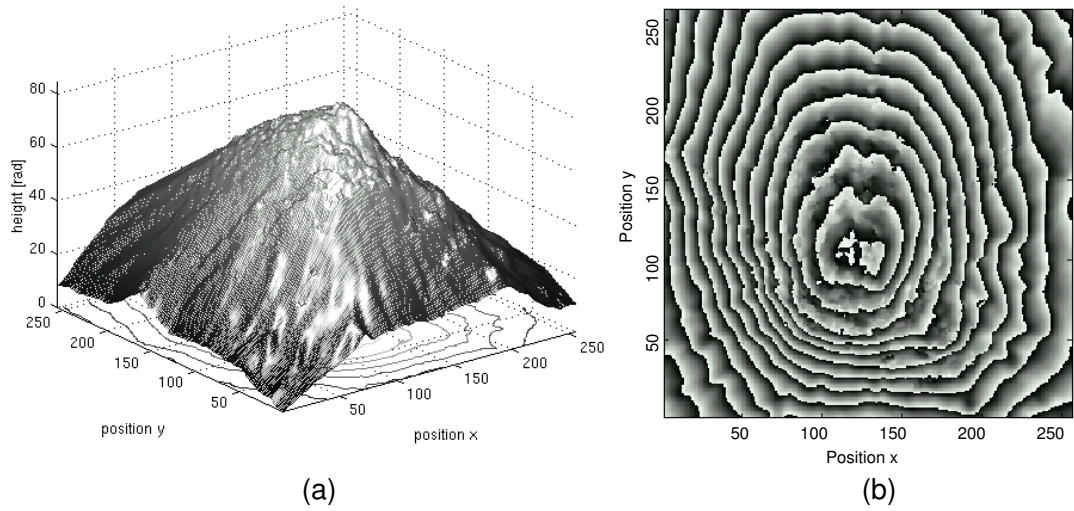


図 5.6: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

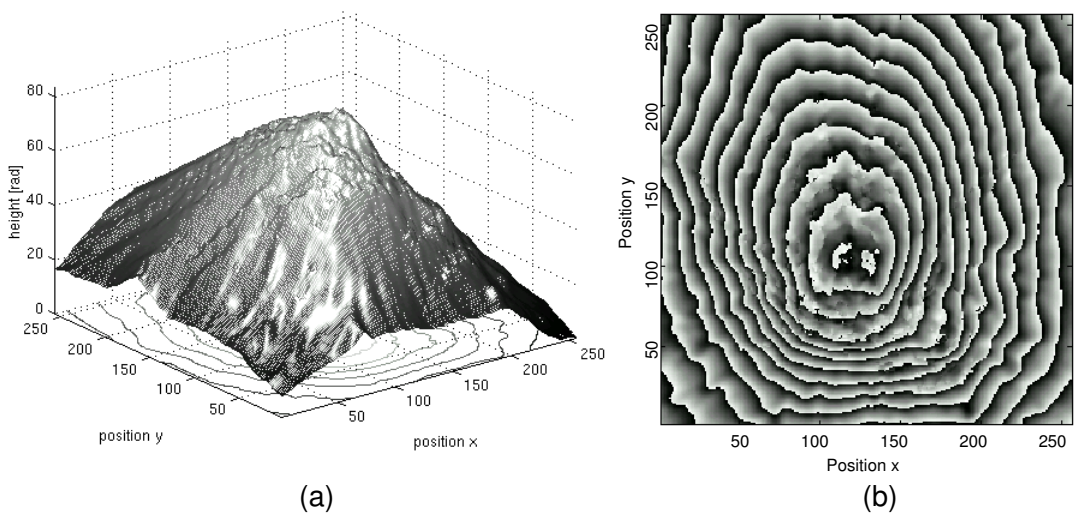


図 5.7: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点を x 方向に 2 点選んだ場合を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

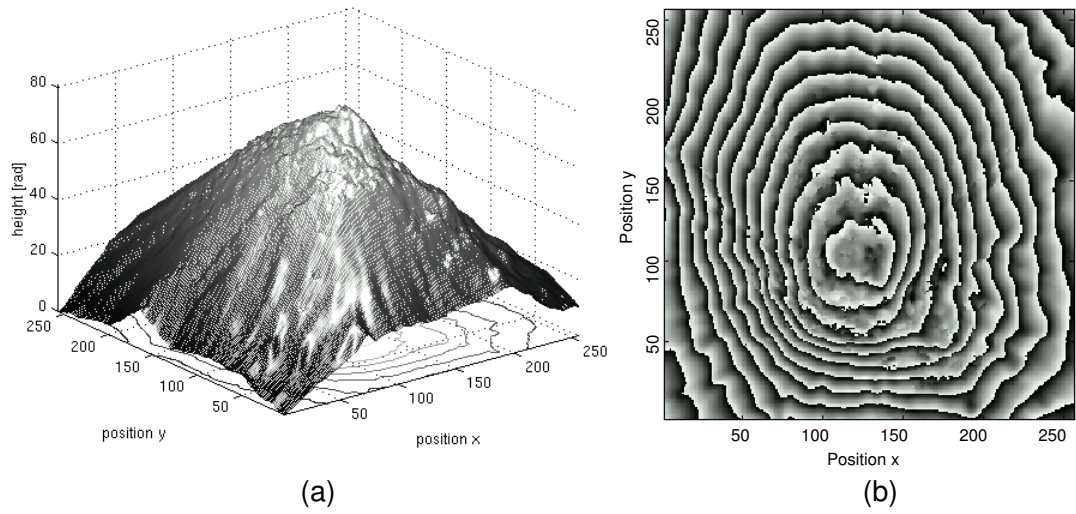


図 5.8: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点を y 方向に 2 点選んだ場合を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

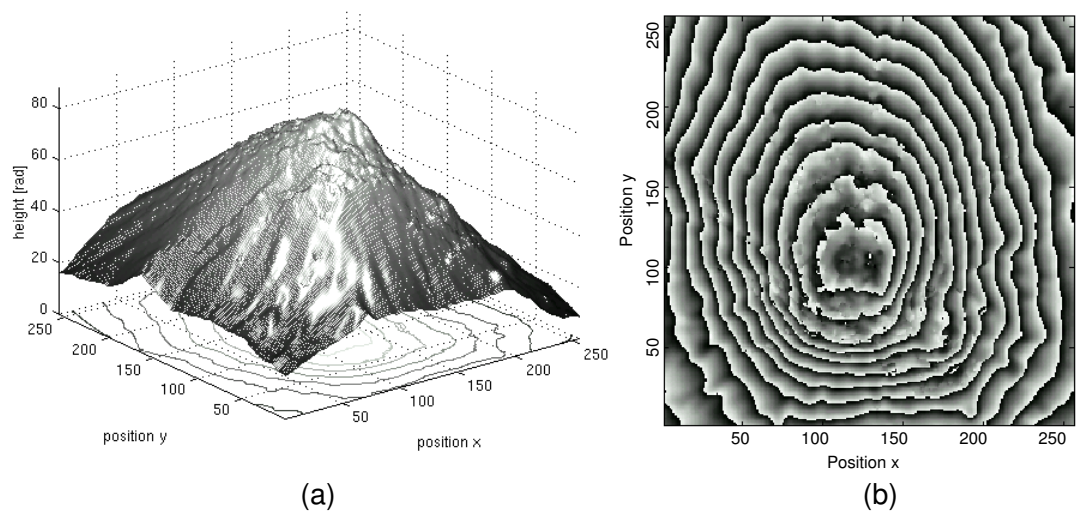


図 5.9: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

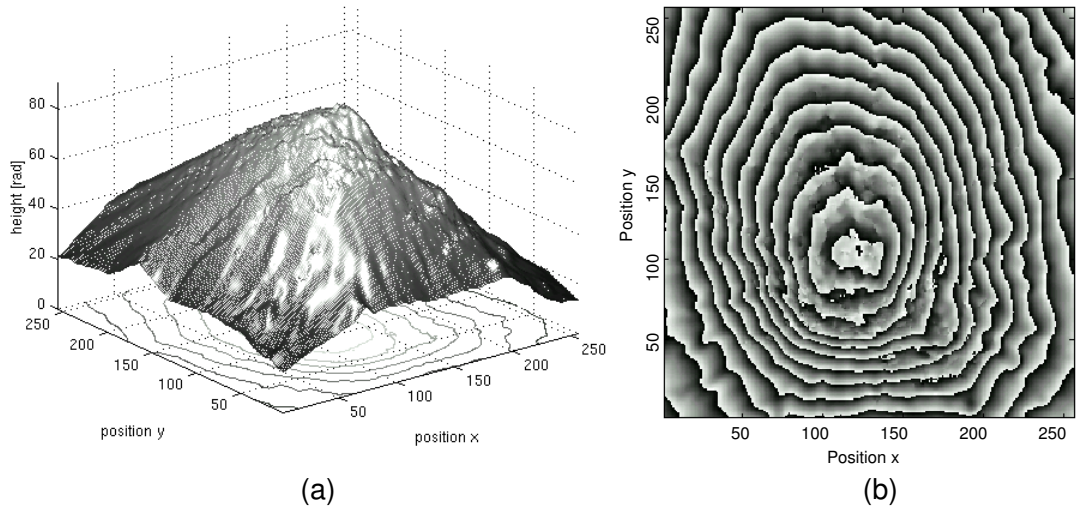


図 5.10: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 4 点を想定した補正: (a) DEM
 (b) 再度折り畳んだ画像

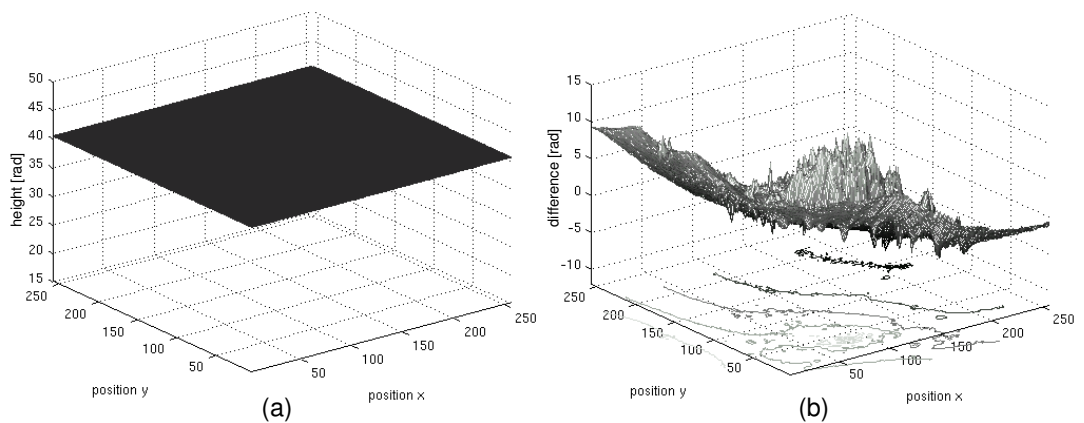


図 5.11: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点 1 点を想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分

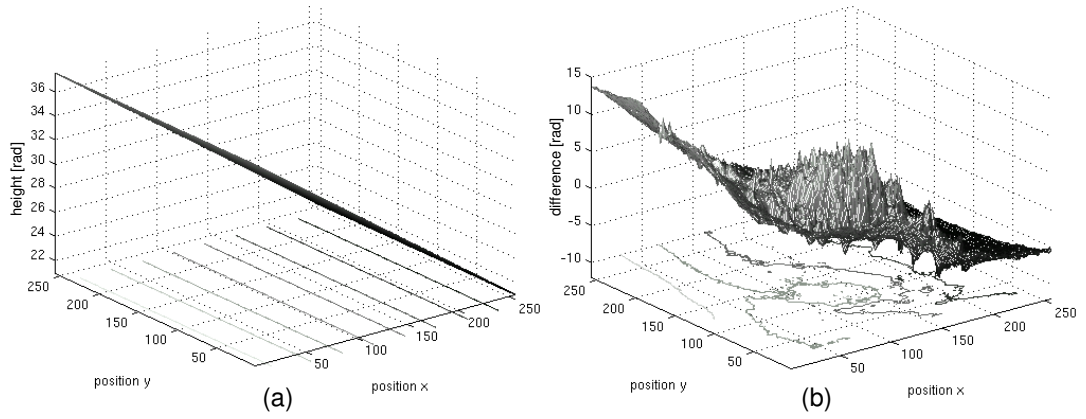


図 5.12: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点を x 方向に 2 点選んだと想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分

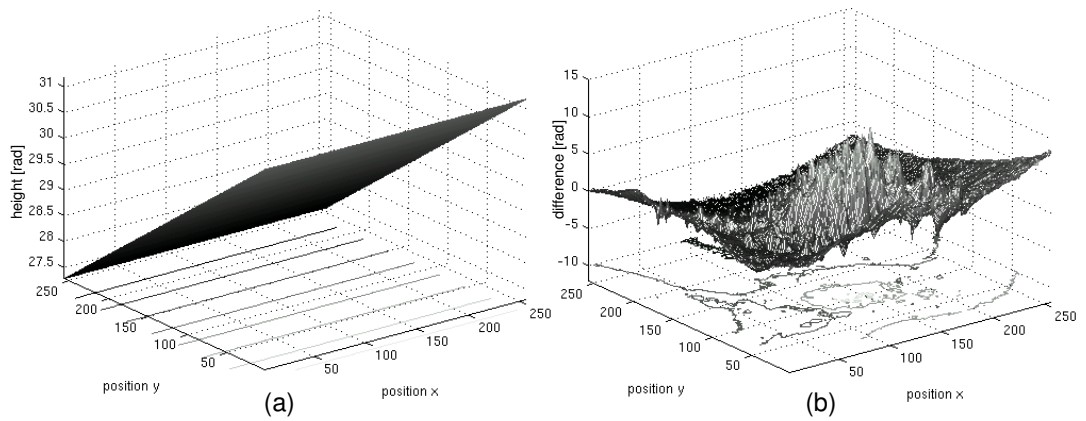


図 5.13: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点を y 方向に 2 点選んだと想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分

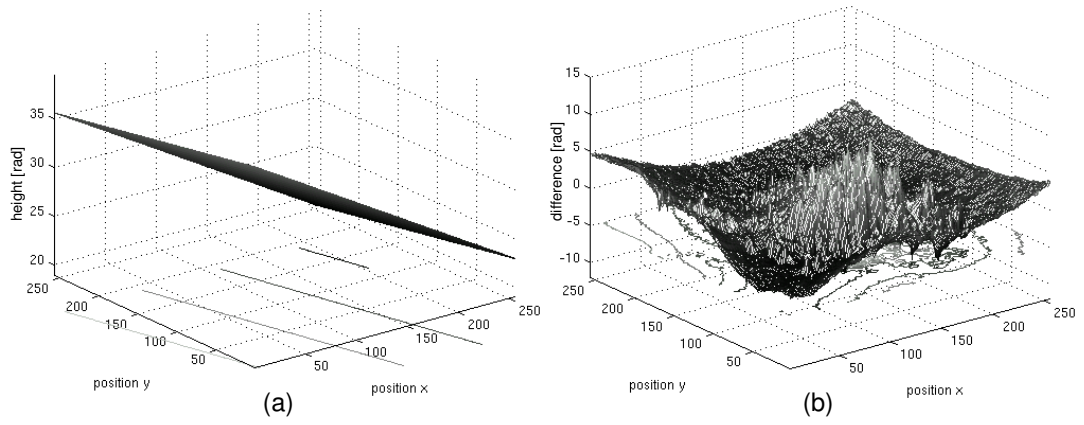


図 5.14: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点 3 点を想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分

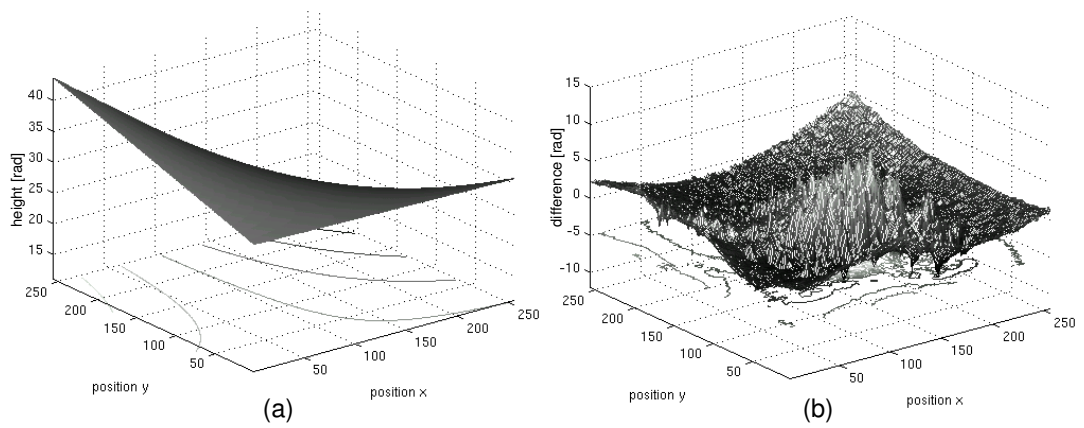


図 5.15: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点 4 点を想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分

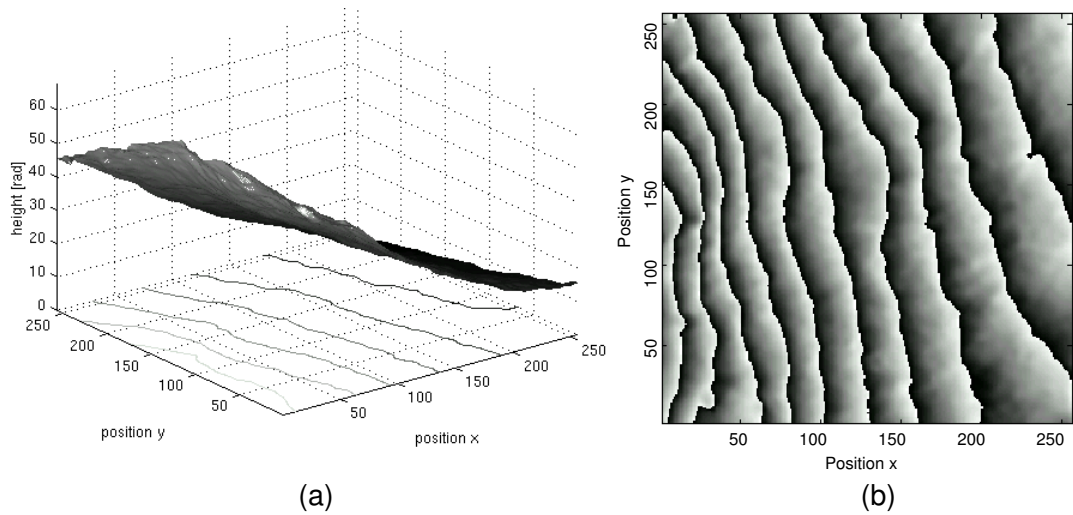


図 5.16: 斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

表 5.3: 斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係

基準点数	1 点	2 点 (x 方向)	2 点 (y 方向)	3 点	4 点
PSNR [dB]	13.5	20.8	15.2	25.8	29.6

補正面の形状及び正解との誤差の様子は補正面を求める時の変数の数に対してそれぞれ図 5.11、図 5.12、図 5.13、図 5.14、図 5.15 のようになった。また、正解の DEM との $PSNR$ を計算した結果は表 5.2 に示す通りである。誤差の様子を変数の数の違いに対してそれぞれ比較すると図 5.14(b) 及び図 5.15(b) は比較することが困難であるが、表 5.2 から分かる通り、4 変数による補正を行うことにより最も正解に近い DEM が得られたことが分かる。

以上より、山頂付近の InSAR 位相画像を用いた GTPU 結果の DEM では四変数法を適用することで適正に補正が行われることが明らかになり、四基準点法が理論的に有効であることが示された。

5.2.2 斜面の InSAR 位相画像を用いた実験

図 5.1(b) の斜面の InSAR 位相画像を用いて GTPU により得られた DEM を基準点数の数に対応する面を推定し補正を行った。補正面を求めるための変数が 1 変数、3 変数、4 変数とした時の結果はそれぞれ図 5.16、図 5.17、図 5.18 のようになった。この 2 つの図の折り畳まれた画像と図 5.1(b) の位相画像を比較する。すると、干涉縞の数が明らかに異なる図 5.16(b) に対して四変数法により補正した図 5.18(b) は干涉縞の数が同じであり補正の効果が現れていることが明らかである。

補正面を求めるための変数が 1 変数、3 変数、4 変数の場合それぞれにおける誤差の様子は図 5.19 のようになった。この図から明らかのように、この例では 3 変数と 4 変数における誤差の様子にそれほど差がないことが分かる。これは、斜面に対する位相アンラッピングであるため、結果の補正のほとんどが平面成分であるからだと考えられる。しかしながら、基準点数の数と PSNR の変化を表す表 5.3 の結果は山頂

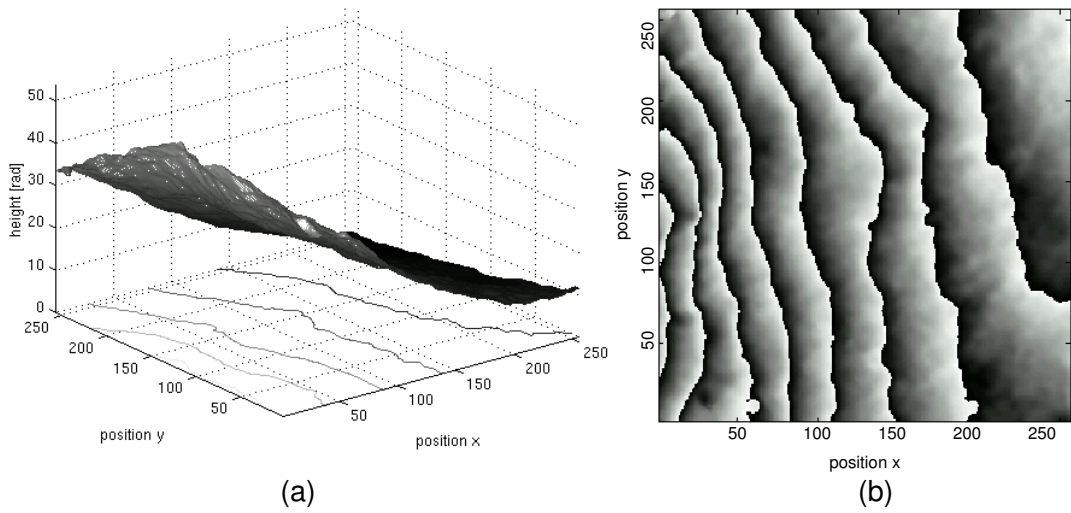


図 5.17: 斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

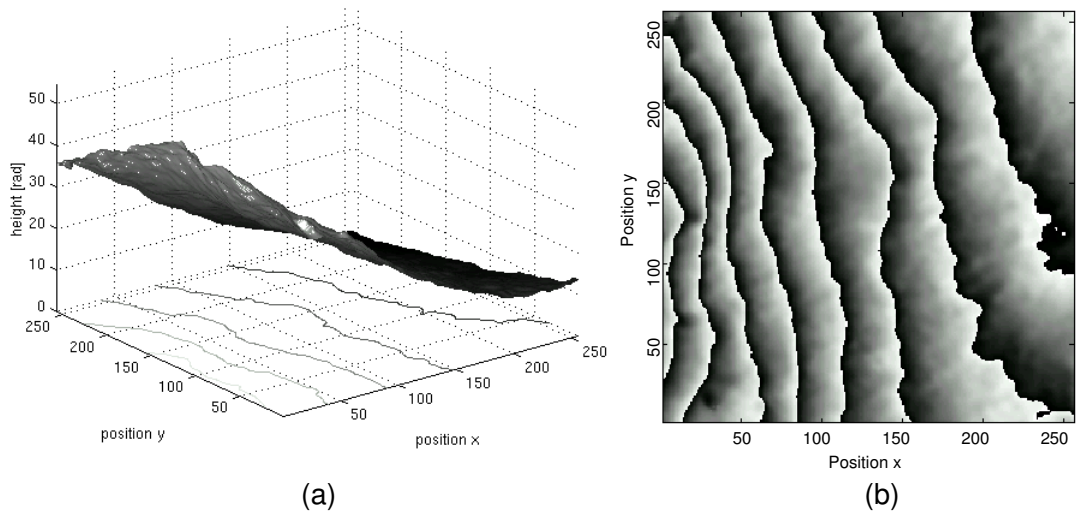


図 5.18: 斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 4 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

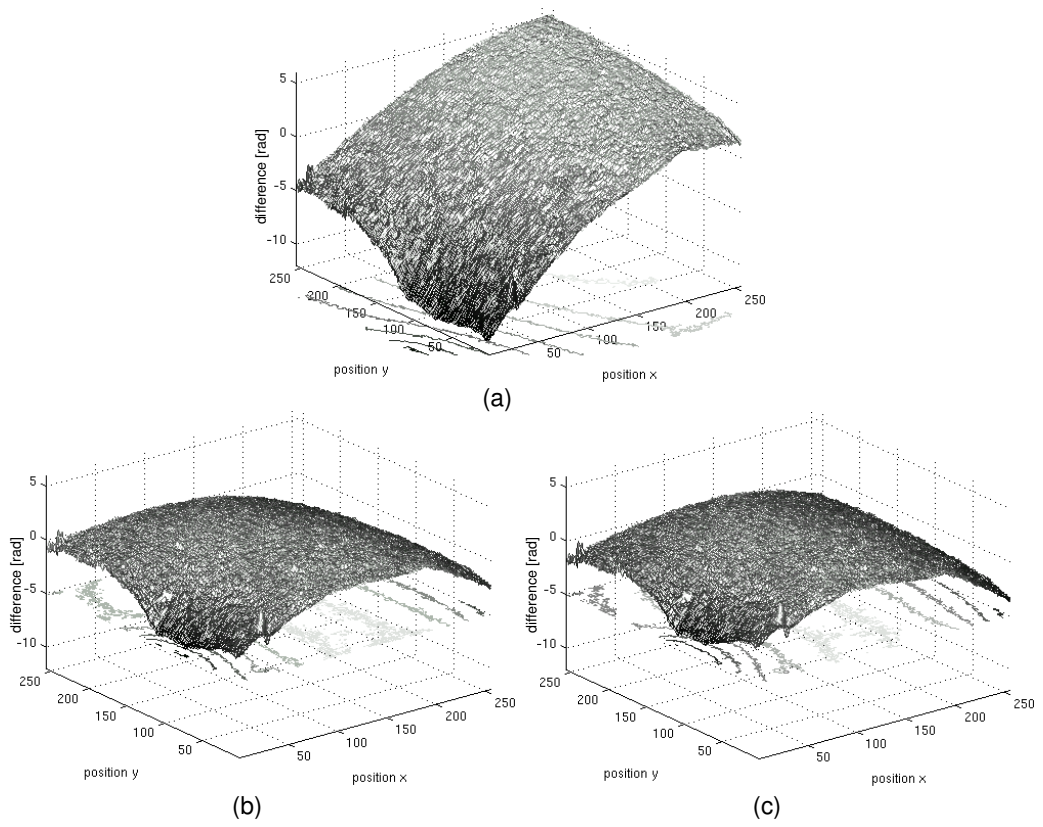


図 5.19: 斜面の InSAR 位相画像を用いた RTPU 結果と 基準点を (a) 1 点、(b) 3 点、(c) 4 点と想定した場合の補正結果との差分

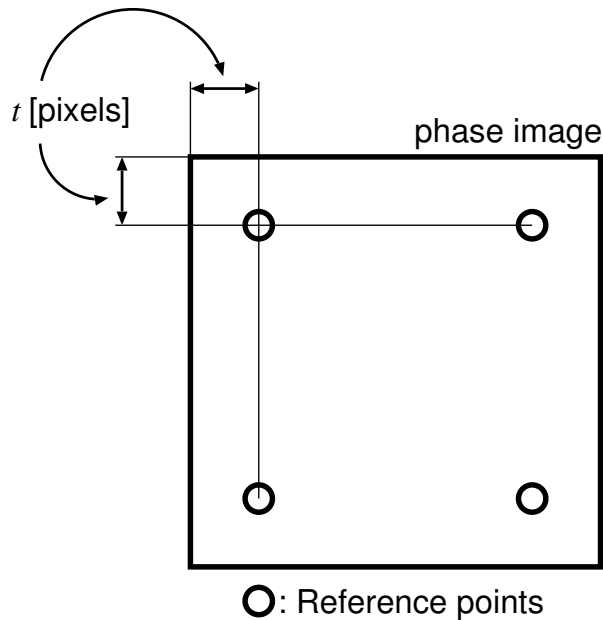


図 5.20: 基準点の選び方

付近の位相画像の場合と同様の改善傾向を持ち、確かに四変数法が有効であることを示しており、四基準点法による補正が理論的に有効であることが示された。

以上より、斜面の InSAR 位相画像を用いた GTPU 結果の DEM でも四変数法を適用することで適正に補正が行われ、四基準点法が理論的に有効であることが示された。

5.2.3 考察

四基準点法が理論的に有効であるのかを確かめるために、式 (4.1) で表される補正面を正解と想定した RTPU 結果の DEM から最小二乗法により求めた。即ち、位相画像の全面素を考慮した補正面を形成することにより、四基準点法で提案した形状の補正面で GTPU 法による DEM が適切に補正できるかを確認した。その結果、山頂付近の InSAR 位相画像及び斜面の InSAR 位相画像の両方において *PSNR* 値の改善が見られた。つまり、補正が適正に行われたことが確認できた。

四基準点法は GTPU 法の解法における問題点を指摘し、その問題点を解決することによって補正を行う。そのため、本実験を通して四基準点法が理論的に有効であることが示されたことにより、GTPU 法の解法における問題点の指摘が適切であったことが示された。

しかしながら、実際の計測方法として四基準点法を応用するためには、少ない数の基準点による補正を行わなければならない。例えば、ある観測領域のすべての場所の高度情報を何らかの別の方法で容易に計測することができれば、位相アンラッピングの必要性はなくなる。式 (4.1) で表される補正面は理論上、基準点が 4 点あれば求められるものであり、基準点が 1 点、2 点、3 点、4 点とした時に四基準点法に基づいた補正が有効であるかどうかを確認せねばならない。

表 5.4: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係：
 $t = 1, 3, \dots, 27$

Reference point	1	2 (x axis)	2 (y axis)	3	4
Max $PSNR$ [dB]	19.2	26.4	19.9	28.1	32.9
Min $PSNR$ [dB]	17.2	23.1	17.8	24.5	29.6

表 5.5: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係：
 $t = 25$

基準点数	1 点	2 点 (x 方向)	2 点 (y 方向)	3 点	4 点
$PSNR$ [dB]	18.9	26.2	19.6	28.1	32.9

5.3 四基準点法の検証

前述の四変数法の実験では、式 (4.1) の四基準点法における補正面を推定するために正解の DEM より全ての画素の位相値を考慮し、最小二乗法により推定面を求めた。しかし、実際の計測方法として四基準点法を用いる場合には少なくとも 4 つの基準点を用いた補正が必要である。そのため、本実験では正解の DEM に対して 4 つの基準点を決定し、GTPU 法による DEM に対して四基準点法による補正法を適用する。4 つの基準点は式 (4.1) で表されているように画像の軸方向に 1 次の成分であると考えられ、その選び方は図 5.20 のように画像の 2 辺から t 画素離れている 4 つの点を基準点とした。ただし、式 (4.1) より考えられる基準点は 3 点であり、4 点目の選び方には便宜上対称性を持たせている。本実験では基準点の選び方による補正精度を確かめるために図 5.20 の t の値を 1 画素から 27 画素まで 2 画素ごとに変化させて調べた。実験の手順は以下ようになる。

1. 図 5.20 のように基準点を決定する
 - (a) 決定した基準点を用いて正解 DEM から 0 次微分成分及び 1 次微分成分が構成する曲面を求める
 - (b) 決定した基準点を用いて GTPU 結果から 0 次微分成分及び 1 次微分成分が構成する曲面を求める
2. GTPU 結果より (b) の曲面を差し引く
3. 2. の結果に (a) の曲面を補正曲面として付加する

以降、基準点の選び方は t を用いて述べることにする。

山頂付近の位相画像を用いた実験

図 5.1(a) の山頂付近の InSAR 位相画像を用いて GTPU により得られた DEM を、選んだ基準点をもとに補正した。画像の端からの画素数 t の値が 1 ピクセルから 27 ピクセルまで変えた基準点を選び、得られたそれぞれの補正結果の $PSNR$ の最大値と最小値を表 5.4 に示す。表 5.4 から分かる通り、基準点が 4 点の場合が最も補正の効果が現れており、四基準点法による補正が有効であることが確認される。

基準点が 1 点、3 点、4 点の場合の DEM 及び折り畳まれた画像はそれぞれ図 5.21、図 5.22、図 5.23 のようになった。得られた DEM を正解の図 5.4 の DEM と比較すると基準点が 4 点の場合が最も正解に近いことが確認できる。また、折り畳まれた画像を InSAR 位相画像の図 5.1(a) と比較すると、基準点が 4 点の場合が最も元の位相画像に対して忠実な DEM が生成できている。

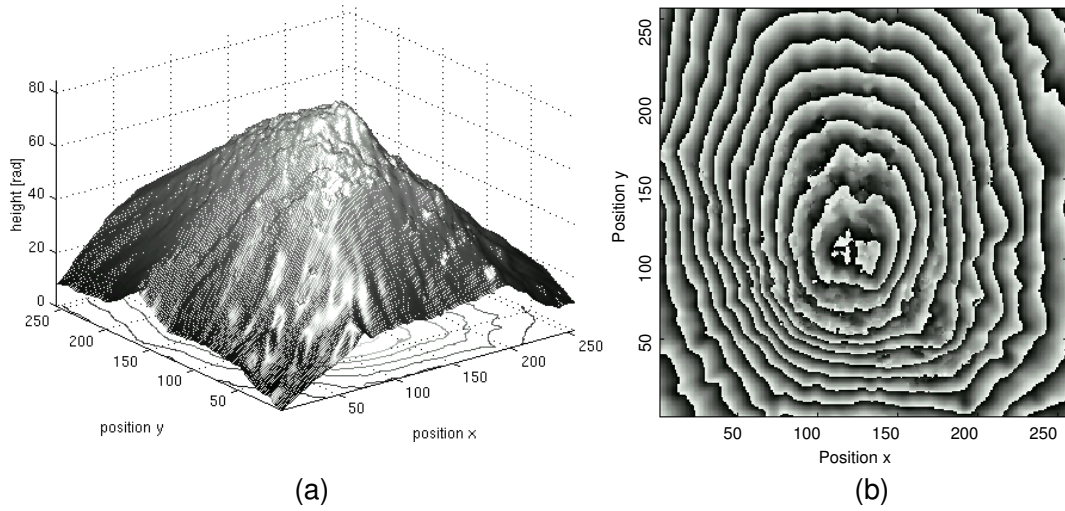


図 5.21: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

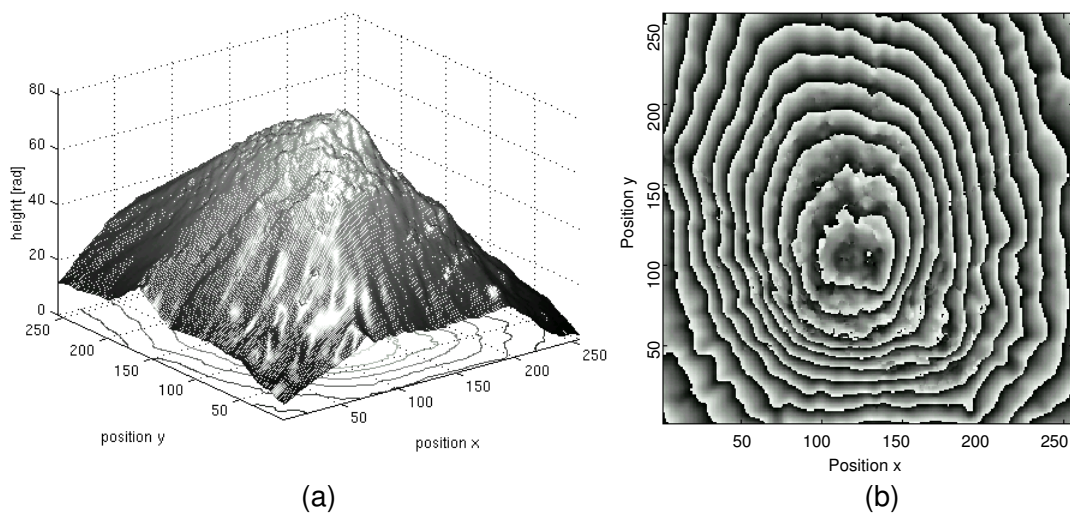


図 5.22: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

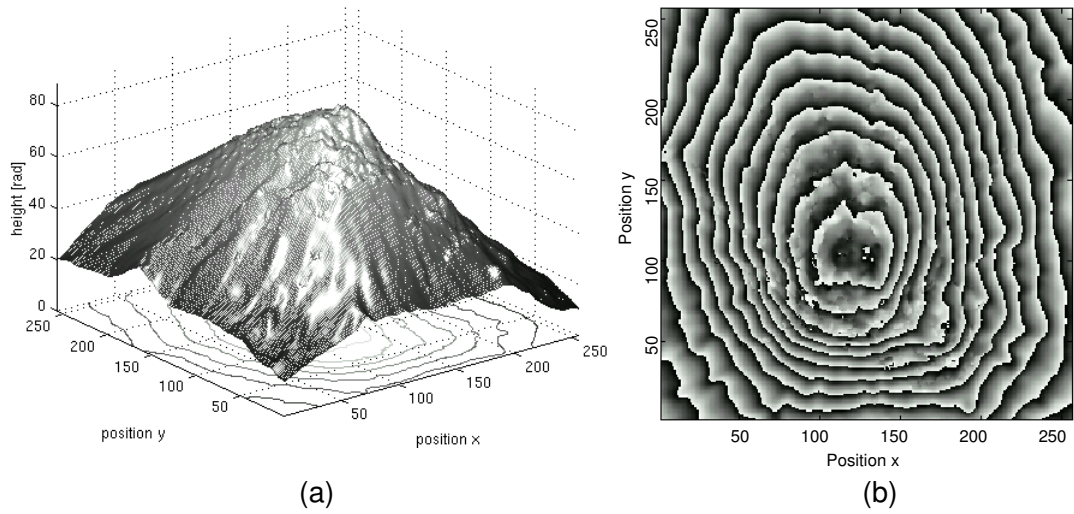


図 5.23: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

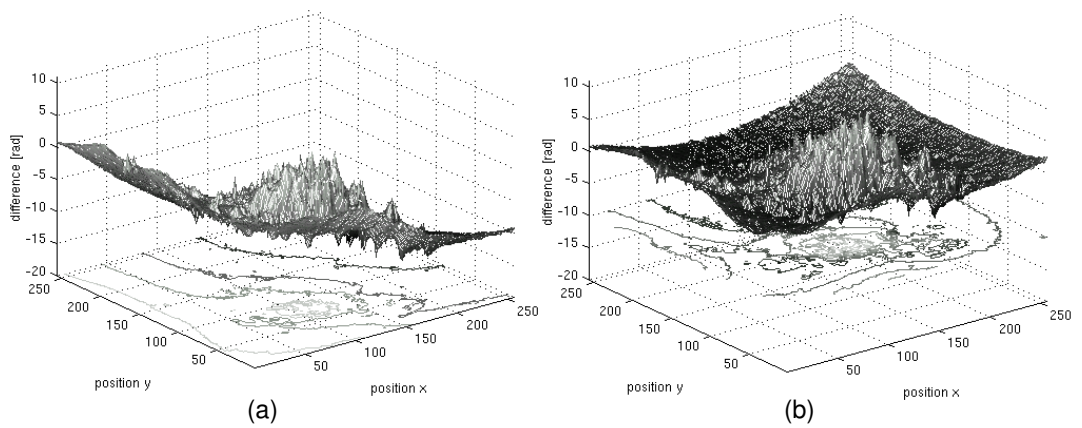


図 5.24: 山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の RTPU 結果と GTPU 結果を基準点 (a) 1 点、(b) 4 点で補正した結果との差分

表 5.6: 斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係: $t = 1, 3, \dots, 27$

Reference point	1	2 (x axis)	2 (y axis)	3	4
Max $PSNR$ [dB]	15.8	24.7	18.2	32.6	32.0
Min $PSNR$ [dB]	13.5	20.9	16.0	28.5	26.8

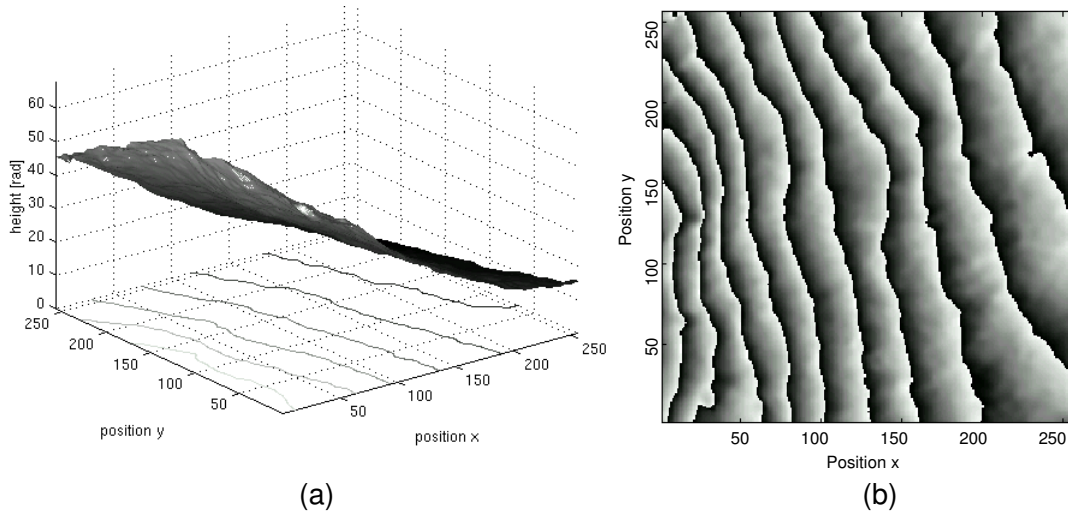


図 5.25: 斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

基準点が 1 点及び 4 点の場合における正解との誤差の様子は図 5.24 のようになった。この図から分かる通り基準点が 4 点の場合では誤差が 0 付近に存在していることが確認でき、基準点が 1 点の場合の補正による誤差の様子と比較して、補正が有効である。また、基準点数と $PSNR$ との関係は表 5.5 のようになり、基準点が 4 点の場合で最も補正の効果が現れている。

5.3.1 斜面の位相画像を用いた実験

図 5.1(b) の斜面の InSAR 位相画像を用いて GTPU により得られた DEM を、選んだ基準点をもとに補正を行った。画像の端からの画素数 t の値が 1 ピクセルから 27 ピクセルまで変えた基準点を選び、得られたそれぞれの補正結果の $PSNR$ の最大値と最小値を表 5.6 に示す。表 5.6 から分かる通り、基準点が 4 点の場合よりも基準点が 3 点の場合による補正が効果的であると確認される。これは図 5.1(b) の位相画像が表す地形は斜面であり、平面として性質が強いためだと考えられる。

表 5.7: 斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係: $t = 27$

基準点数	1 点	2 点 (x 方向)	2 点 (y 方向)	3 点	4 点
$PSNR$ [dB]	15.8	18.2	24.7	32.6	32.0

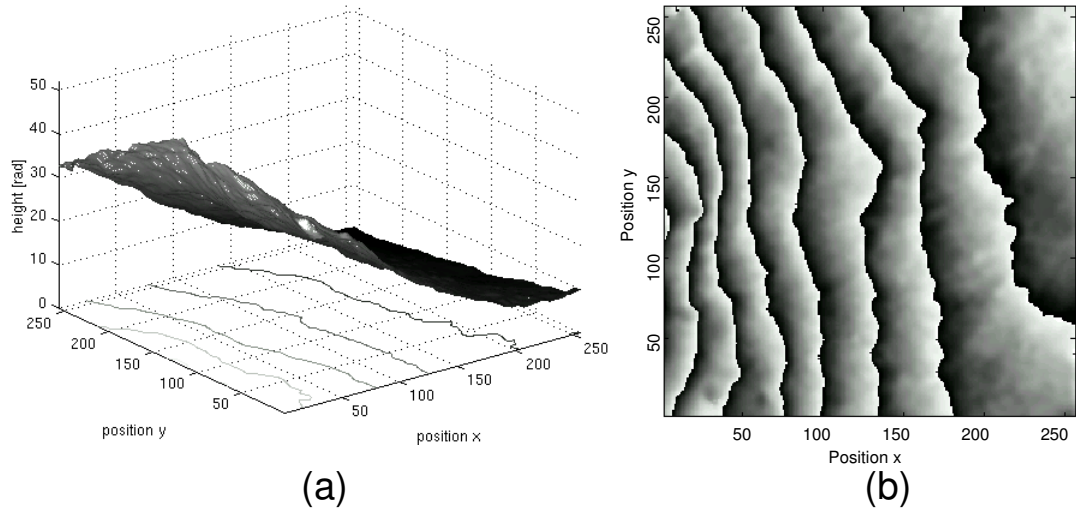


図 5.26: 斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

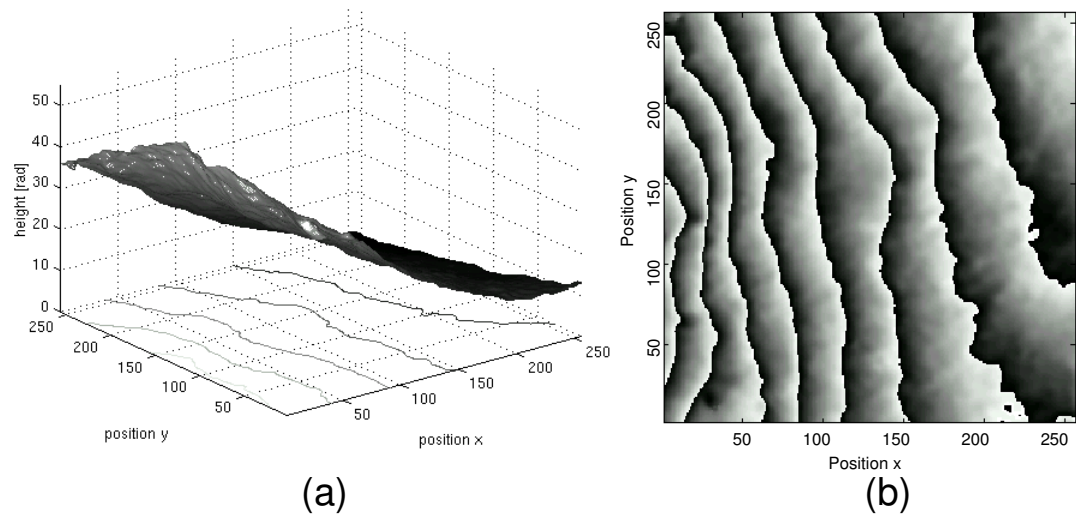


図 5.27: 斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 4 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

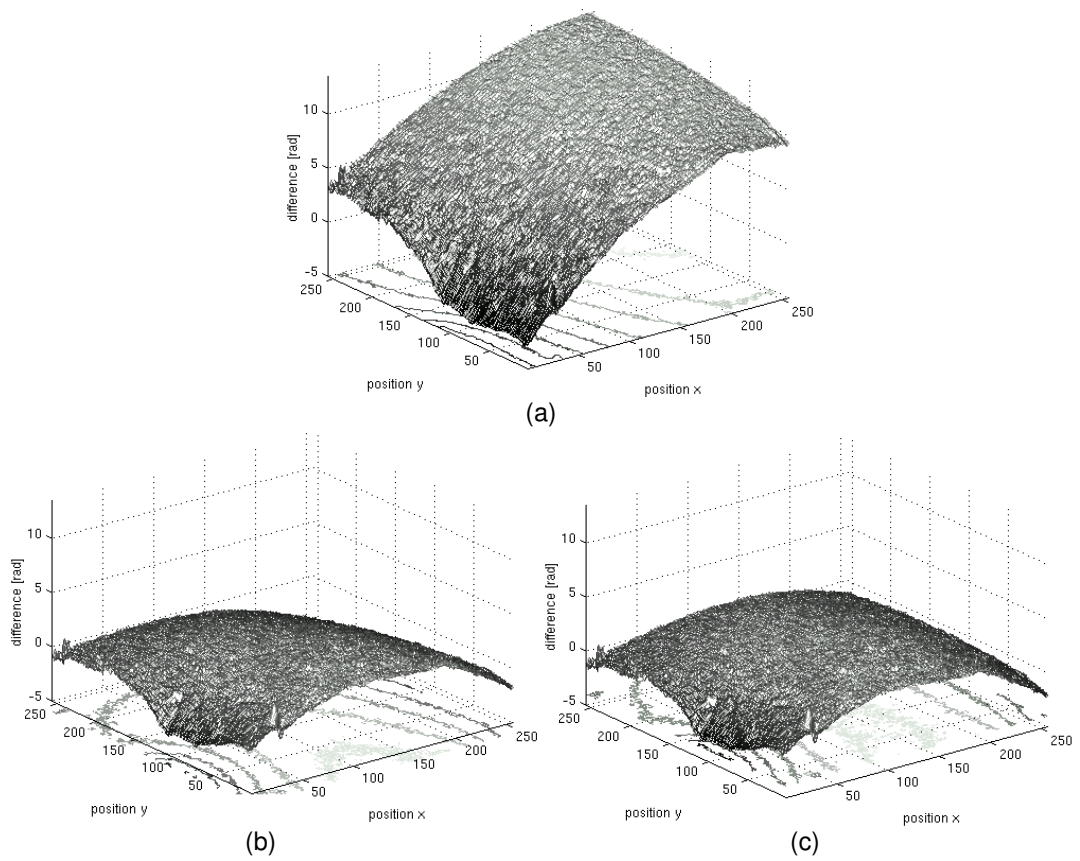


図 5.28: 斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の RTPU 結果と GTPU 結果を基準点 (a) 1 点、(b) 3 点 (c) 4 点で補正した結果との差分

基準点が 1 点、3 点、4 点の場合の DEM 及び折り畳まれた画像はそれぞれ図 5.25、図 5.26、図 5.27 のようになった。得られた DEM を正解の図 5.4 の DEM と比較すると基準点が 3 点の場合及び 4 点の場合は基準点が 1 点の場合と比較して正解に近づいていることが確認できる。また、折り畳まれた画像を InSAR 位相画像の図 5.1(b) と比較すると、基準点が 3 点の場合及び 4 点の場合において干渉縞の数の点で補正が有効であることが確認できる。

基準点が 1 点、3 点、4 点の場合における正解との誤差の様子は図 5.28 のようになった。この図から分かる通り基準点が 3 点の場合及び 4 点の場合では誤差が 0 付近に存在しており、基準点が 1 点の場合と比較して補正した DEM が正解に近づいていることが分かる。基準点を変えた時の $PSNR$ の変化から分かるように基準点が 3 点の場合と 4 点の場合とで差を認識することは困難である。しかしながら、基準点が 1 点の場合と比較して補正が有効であることは確認できる。このときの基準点数と $PSNR$ の関係を表 5.7 に示す。基準点が 3 点の場合における補正が最も効果的であるが、基準点が 4 点の場合においても補正による効果が存在する。

5.3.2 考察

四基準点法が理論的に有効であることが示されたため、実際に基準点を 1 点、2 点、3 点、4 点位相画像中から選び、四基準点法により GTPU による DEM の補正を試みた。

山頂付近の位相画像を用いた場合でも、表 5.4 に示す通り補正の効果があつた。正解との誤差の様子を表す図 5.24 から基準点が 4 点の場合において最も正解と近づいていることが確認できる。しかしながら、四変数法で補正した結果の $PSNR$ の値は表 5.2 から分かる通り、基準点の選び方に依らず四基準点法による補正よりも良い結果が得られたことを示している。これは正解 DEM から基準点を 4 点選び補正する方法では完全な補正面を推定することが困難であることを示している。ただし、四基準点法による補正において最も補正精度が大きい場合では四変数法に対して $PSNR$ の値を考えると大きく劣りはしない。即ち、基準点の選び方依存はするが、GTPU 法では得られる DEM の補正の必要性及び四基準点法の有効性を示している。

斜面の位相画像を用いた場合では、四変数法による補正では、その有効性を示せたが、四基準点法においては表 5.6 に示す通り、基準点が 3 点の場合で最も補正の効果が現れている。また正解との誤差の様子を表す図 5.28 を見ると、確かに基準点が 1 点の場合と比較して基準点が 4 点の場合では補正が有効であることが確認できるが、基準点が 3 点の場合と比較すると大きな差は確かめられない。これは斜面を表す位相画像であり、求めたい DEM では平面としての性質を持っているため、四変数法による補正では多くの画素を考慮した補正面を推定できたが、基準点が 4 点の場合では補正面として曲面を推定してしまうからだと考えられる。しかしながら、四変数法による補正が効果的であることが表 5.3 から確認されるため、斜面においても補正すべき面は曲面であることが考えられる。ただし、四基準点法による斜面の位相画像を用いた場合の補正では、基準点が 4 点では補正面として適正に曲面を推定できなかったため、補正面として平面を推定する基準点が 3 点の場合において最も補正の効果が現れたと考えられる。

GTPU 法により生じる歪みは四基準点法によって補正することが可能であると示されたが、その基準点の選び方は、本実験では便宜的なものであつた。実際の計測方法へ応用する場合には、基準点の選び方に対する明確な方法が必要になると思われる。また、本実験では基準点を 4 点までに限定して補正を試みたが、基準点数に関しては、少なく抑えることにより、応用しやすいことはあるだろうが、4 点に固執する必要はないと思われる。さらに四基準点法を活用するためには、基準点数、基準点の選び方という点において調べる必要がある。

第 6 章： 基準点数およびその選択方法

6.1 実験における諸設定

5章の実験により、GTPU法によるDEMの歪みは四基準点法により補正することが可能であることが確かめられた。そこで、本実験では、実際の計測方法として応用するために最も重要だと考えられる適した基準点数及びその選択方法に関して実験を行った。用いた位相画像は5章の図5.1(a)の山頂付近のInSAR位相画像である。また同様に、位相アンラッピングの正解DEMとして5章の図5.4のSuksmonoらによるRTPU法による結果を用いた。さらに、補正による精度の評価方法は前述の通りPSNR値を以て評価した。ただし、四基準点法を用いた補正により最も補正精度が良かったのは、四基準点法の理論的検証における場合にあり、そのPSNR値は33.80[dB]であった。

6.2 基準点の配置

まず、基準点の選び方について調べる前に4つの基準点の配置の仕方について考察する。四基準点法では、GTPU法の解法上に位相画像の0次微分成分及び1次微分成分が欠落することに注目したものである。そして、その欠落する情報は位相画像の軸方向に1次元であることも確認できる。即ち、ある理想的な基準点が1点定まれば、2点目及び3点目の基準点に関しては、1点目の基準点に対して位相画像の軸方向に平行な場所から選ぶことにより、欠落する情報を補正することができると考えられる。例えば、位相画像の軸を x 軸及び y 軸と設定すると、ある1つ目の基準点の座標が $(x, y) = (10, 11)$ であるとき、2つ目及び3つ目の基準点の座標は任意の数 i, j を用いて $(x, y) = (10, i)$ と $(x, y) = (j, 11)$ と決めることが妥当である。では、4点目の基準点に関してはどのような決定方法が妥当であるだろうか。そこで、筆者はある3つの基準点を決定した状態において、どのような領域において四基準点法による補正が有効であるかを検証する。

図6.1のように3つの基準点を予め決定した後に、4つ目の基準点を線分A、B、C、D上に選び、その4つの基準点を用いた補正を行った結果、PSNR値がどのように変化するかを実験した。予め決めた3つの基準点は、それぞれ $(x, y) = (10, 10)(10, 200)(200, 10)$ とした。さらに、線分A、B上では前述の点より10画素ずつずらした点を選び、PSNR値を求めた。線分C、D上では点をそれぞれ5画素、2画素ずつずらした点を選んだ。即ち、線分A上の点では座標(20, 20)から(30, 30)、(40, 40)と10画素ずつ動かして(250, 250)まで調べたということである。

その結果、PSNR値の変化の様子は図6.2及び図6.3のようになった。図6.2は線分A上に4つ目の基準点を選んだ場合のPSNR値の変化の様子である。ただし、横軸は位置を表し、軸の小さい方から(20, 20)、(30, 30)と位置を示している。この結果、4つ目の基準点に(80, 80)を選んだ場合に一度PSNR値のピークがあり、その値は28.47[dB]である。また、全体の中での最大値は(200, 200)を選んだ場合の32.37[dB]となった。つまり、4つ目の基準点を選ぶ領域としては、3つの基準点で作られる長方形領域の外において比較的高精度の補正が行えていることが分かった。

また、図6.3は線分B、C、D上におけるPSNR値の変化の様子を示したものである。ただし、横軸は位置を表しているが、便宜上、線Aと重なる点を中心に位置の変化を表している。この結果から、3つの基準点で作られる長方形領域の内側を走査した線B上のPSNR値よりも、長方形領域の外側を走査した

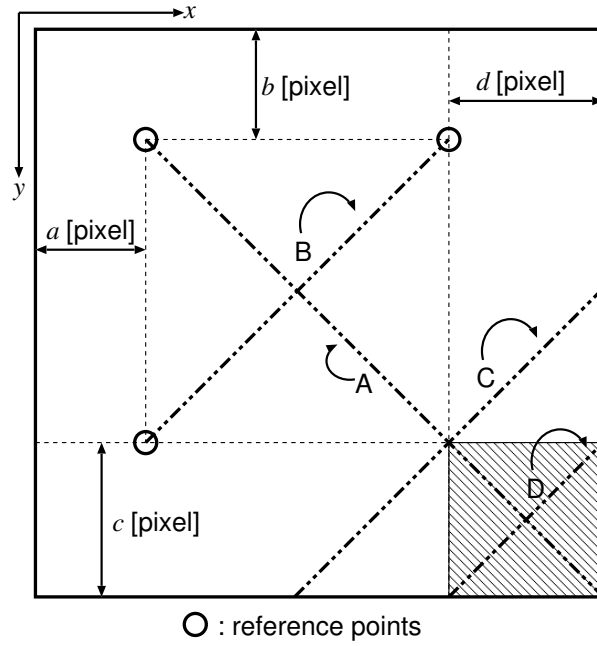


図 6.1: 3つの基準点と線分 A、B、C、D 上の 4 番目の基準点

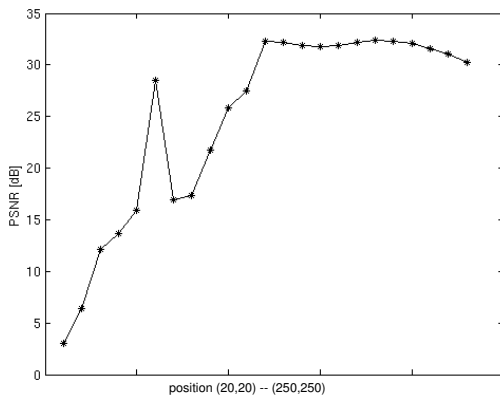


図 6.2: 線分 A 上の PSNR 値の変化の様子

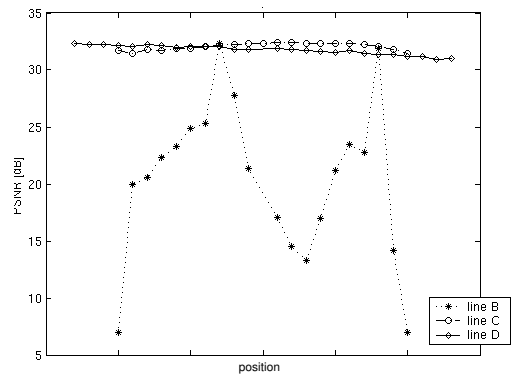


図 6.3: 線分 B、C、D 上の PSNR 値の変化の様子

表 6.1: PSNR 値による補正精度: 上位 10 組及び下位 5 組

PSNR [dB]	Four reference point position
33.786	(1,181) (1,31) (251,181) (251,51)
33.780	(1,211) (1,31) (221,211) (251,51)
33.77773	(1,211) (1,181) (221,211) (251,181)
33.77771	(1,21) (1,231) (101,21) (131,241)
33.7773	(1,211) (1,31) (221,211) (221,41)
33.7772	(1,21) (1,221) (101,21) (121,241)
33.7771	(2,5) (2,222) (85,5) (195,222)
33.7770	(2,5) (2,222) (85,5) (145,242)
33.7768	(2,5) (2,222) (85,5) (125,242)
33.7767	(2,5) (2,162) (85,5) (225,202)
9.33	(48,109) (48,108) (129,109) (169,128)
9.08	(92,125) (92,102) (135,125) (255,142)
5.75	(92,125) (92,102) (135,125) (155,122)
4.95	(146,131) (146,256) (151,131) (251,256)
2.00	(92,125) (92,102) (135,125) (255,132)
33.80	全画素を基準点とした補正 (図 5.15 参照)
17.18	従来方法 (未補正)

線 C 及び D 上での PSNR 値が明らかに優れていることが分かる。また、この 3 つの線分上で最も優れていた結果は線 C 上の (190, 210) を選んだ場合ではあるが、線 C 及び D 上での補正精度には大差が無いことが図 6.3 より分かる。

以上、図 6.2 及び図 6.3 の結果を総合的に判断すると予め選んだ 3 つの基準点で作られる長方形領域の外側で、線分 D の周辺に最適な 4 つ目の基準点を見いだすことができそうである。従って、3 つの基準点のどの 2 点も画像の枠に対して平行に選んだ状態であれば、4 つ目の基準点は、選んだ 3 つの基準点が為す長方形領域の外側で線分 D に相当する部分の周辺に対して走査すれば良いことが分かった。

6.3 基準点の特徴

6.2 節の実験において、四基準点法の理論から予想されるように 3 つの基準点を選んだ場合では、4 つ目の基準点の選ぶべき領域が分かった。即ち、ある基準点に対して、画像の 2 つの軸方向に平行に 2 つの基準点を選び、その 3 つの基準点が成す長方形領域の外側で図 6.1 における線分 D がある部分から 4 つ目の基準点を選べば良い。具体的には、線分 D のある長方形領域 (図 6.1 において斜線がひかれた部分) から 4 つ目の基準点を選べばよい。その結果、比較的四基準点法による補正が有効となる基準点を選ぶことができる。本実験では、以上の基準点の選び方に基づいて 4 つの基準点を決定し、どのような点を選ぶことで補正が有効であるのかを調べることが目的である。また、用いた位相画像は図 5.1(a) の山頂付近のものである。しかしながら、用いた位相画像は 256×256 [pixels] のサイズであり、上記のように基準点を選んだとしても、その組み合わせは膨大である。筆者はその膨大な組み合わせの中から 1053969 通りの組み合わせについて補正精度を計算し、選ばれた点の共通する特徴を見いだそうと試みた。

補正を試みた組み合わせの中で最も補正が有効である基準点の組み合わせを上位 10 通り及び下位 5 通り

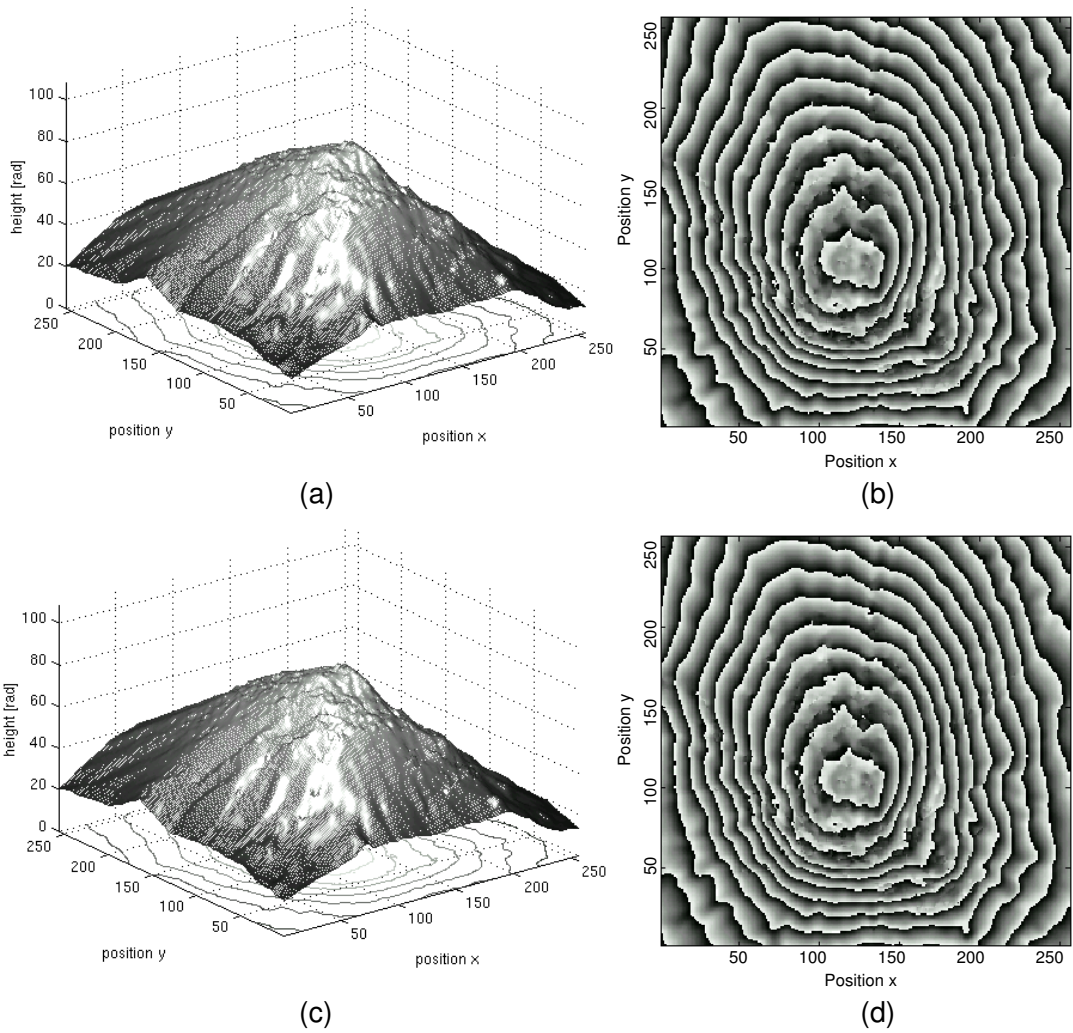


図 6.4: 最も補正が有効であった結果 : $PSNR = 33.786$ [dB] (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像及び、全画素を用いた補正 : $PSNR = 33.798$ [dB] (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像

表 6.2: InSAR 位相画像の 2 次微分値

位置	$\rho_{i,j}$	$\rho_{i,j}$ の隣接画素での平均	$\hat{\rho}_{i,j}$	$\hat{\rho}_{i,j}$ の隣接画素での平均
上位 10 組				
(1,181)	-1.3	-0.75	1.3	0.77
(1,31)	-0.082	-0.045	0.12	0.095
(251,181)	0.091	0.068	0.091	0.071
(251,51)	0.019	0.010	0.023	0.030
(1,211)	2.7	0.40	2.7	1.4
(221,211)	-0.10	-0.076	0.10	0.091
(1,21)	0.024	0.00097	0.032	0.035
(1,231)	0.26	0.24	0.48	0.42
(101,21)	0.097	0.074	0.097	0.074
(131,241)	0.034	0.015	0.054	0.046
(221,41)	0.0036	-0.0080	0.037	0.030
(1,221)	0.098	0.51	2.7	1.4
(121,241)	0.047	0.033	0.047	0.055
(2,5)	-0.27	-0.62	0.32	0.71
(2,222)	0.33	0.21	0.57	0.38
(85,5)	0.028	0.017	0.040	0.041
(195,222)	-0.061	-0.041	0.061	0.047
(145,242)	0.025	0.0090	0.058	0.042
(125,242)	0.0086	0.0042	0.017	0.042
(2,162)	-0.15	-0.15	0.15	0.17
(225,202)	0.047	0.041	0.079	0.064
下位 5 組				
(92, 125)	0.90	-0.067	0.90	0.53
(92, 102)	0.61	-0.12	0.61	0.42
(135, 125)	2.1	-0.13	2.1	1.1
(255, 132)	0.61	-0.13	0.70	1.0
(146, 131)	1.0	0.074	2.1	1.2
(146, 256)	3.4	-0.033	3.4	1.4
(151, 131)	1.0	-0.081	1.0	0.86
(251, 256)	1.3	-0.054	1.3	0.99
(155, 122)	1.9	-0.0029	1.9	1.3
(255, 142)	0.62	-0.088	0.62	0.45
(48, 109)	0.96	-0.0086	0.96	0.35
(48, 108)	0.67	-0.0096	0.67	0.34
(129, 109)	0.75	-0.024	0.75	0.55
(169, 128)	0.91	0.018	2.2	1.5
Maximum	6.93		7.0	
Minimum	-6.98		0	

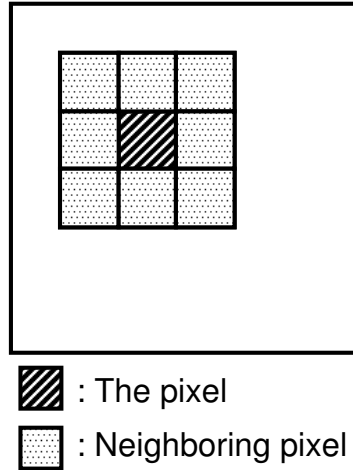


図 6.5: 注目している画素とその隣接画素

を表 6.1 に示す。この時、最も補正が有効であった場合の得られた DEM 及び再度折り畳んだが画像を図 6.4(a) 及び (b) に示す。また、比較のために全画素を用いて四基準点法に基づく補正面を求め補正を行った結果を同じく図 6.4(c) 及び (d) に載せる。この全画素を用いた補正は四基準点法の理論的検証を行った 5.2 節において求めたものであり、山頂付近の InSAR 位相画像を用いた補正において最も *PSNR* 値が大きい結果である。それに対して、(1, 181)(1, 31)(251, 181)(251, 51) の 4 点による補正も *PSNR* 値を見る限り、全く劣らずさらに、図 6.4(a) と (c) 及び (b) と (d) を比較しても大きな違いを確認できない。即ち、全画素を用いずとも四基準点法による補正では、何らかの方法で理想的な基準点が 4 点選ばれるならば、GTPU 結果を適正に補正することができると言える。

そこで、理想的な基準点を選ぶための何らかの方法が見いだすことは、実際の計測方法に応用するために非常に重要になってくる。GTPU 法の解法上の問題点を四基準点法により補正することができることが分かったが、理想的な基準点に共通の特徴を見いだすことが必要である。ここで、筆者は GTPU 法の解法において 0 次微分成分及び 1 次微分成分の欠落が DEM の歪みに影響することを踏まえて、位相画像の 2 次微分値が理想的な基準点の特徴に関係があるのではないかと考えた。そこで、考えられる値は GTPU 法における $\rho_{i,j}$ である。

四基準点法の性質から、実際の地形の形状においてどのような点が基準点として望ましいのかを考える。四基準点法では、補正面として画像の軸方向に 1 次の曲面を生成する。そして、 xy という積の形で曲面が形成される。従って、この歪みは非常に空間周波数が低く、形状に大きな影響をもたらす。また、低周波であるため 4 つの基準点はできるだけ離れているべきである。一方、擾乱を与える要因は、これよりも高次の項であり、例えば 2 次微分値が小さい場所を選ぶべきであると考えられる。このことを地形の形状に置き換えて考えると、地形の高度の変化があまり変わらない場所から基準点を選ぶべきであり、局所的に高度変化が大きい場所などは除外するべきである。しかし、GTPU 法で用いる式 (3.4) の 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ を用いて、以上のような場所を絞り込むことができない。それは、峠のような画像の軸方向に逆の変化、例えばある軸方向に 2 次微分値が正である場合にもう一方の軸方向には負である場合には、 $\rho_{i,j}$ の値は相殺され、小さくなってしまふ。

従って、GTPU 法における $\rho_{i,j}$ は、四基準点法の性質を踏まえた基準点の特徴を完全に捉えられるとは言い難い。そこで、この $\rho_{i,j}$ に対して、以下のように $\hat{\rho}_{i,j}$ を定義した。

$$\hat{\rho}_{i,j} = |\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x| + |\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y| \quad (6.1)$$

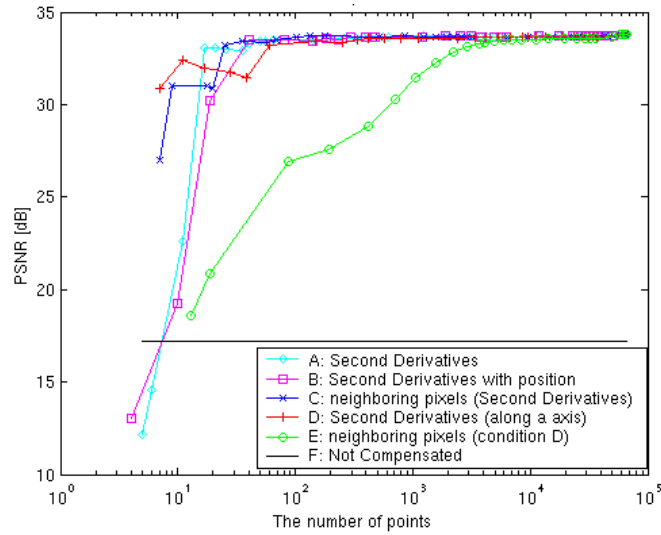


図 6.6: 絞り込んだ基準点における数と $PSNR$ 値との関係 条件は A:2 次微分値 $\rho_{i,j}$ のみ B: 基準点の配置を考えた 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ C: 配置を考えた隣接画素の 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ D: 基準点の配置を考えた 2 次微分値 $\hat{\rho}_{i,j}$ E: 配置を考えた隣接画素の 2 次微分値 $\hat{\rho}_{i,j}$ D: 未補正の場合

また、再掲になるが、GTPU 法における $\rho_{i,j}$ は以下のような式になる。

$$\rho_{i,j} = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y) \quad (6.2)$$

ただし、 $\Delta_{i,j}^x$ 及び $\Delta_{i,j}^y$ は位相画像の軸方向、即ち x 方向 (i 方向) 及び y 方向 (j 方向) への 1 次微分値 (差分値) である。この位相画像の 2 次微分値である $\rho_{i,j}$ 及び $\hat{\rho}_{i,j}$ を基に基準点の特徴と捉えたということである。表 6.1 に出てくる基準点の座標において 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ 及び $\hat{\rho}_{i,j}$ がどのようなになっているのかを表 6.2 に示す。また、微分値について考えているため、選ばれた画素の隣接画素を含めた平均値も同様に掲載した。ただし、隣接画素とは図 6.5 のように定めた。この表 6.2 から分かれるとおり、選ばれた基準点における 2 次微分値は上位 10 組における点が下位 5 組における点よりも 0 付近の値となっていることが分かった。

6.4 特徴を捉えた基準点の絞り込み

本実験では、6.2 節及び 6.3 節において選ぶべき基準点の配置や特徴を推測したので、その推測がどの程度正確であるのかを検証した。まず、位相画像の各画素における 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ 及び $\hat{\rho}_{i,j}$ を計算し、それぞれの画素における値がどれくらい 0 に近いのかで、基準点数の絞り込みを行った。さらに、6.2 節において基準点の配置では、ある基準点に対して、画像の軸方向に平行に 2 点を選ぶことが妥当であると考えたため、2 次微分値で絞り込みを行った後に、選ばれた画素の配置が理想的であるのかを調べた。また、6.3 節において補正が有効である基準点において 2 次微分値はそれほど 0 付近の値では無いが、隣接画素の平均値では 0 付近の値を持つことが分かったため、各画素において隣接画素の 2 次微分値の平均値を絞り込みの条件として調べた。その結果、図 6.6 のようになった。

絞り込みの条件に関わらず、基準点数の減少に伴い補正精度である $PSNR$ 値も減少する傾向が得られた。また、基準点数が 20 点程度より少なくなると、 $\hat{\rho}_{i,j}$ による絞り込み以外では極端に精度が劣るように

なることも分かった。次に絞り込みの条件による違いを見る。図 6.6 の A、即ち 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ のみを絞り込みの条件とした結果では、基準点数が 17 点までは $PSNR$ 値が 33.06[dB] と比較的良好な結果が得られている。しかし、基準点数が 11 点となると $PSNR$ 値が 22.61[dB] となり、さらに 5 点の場合では 12.18[dB] となった。5 点の場合では、補正をしていない場合の 17.18[dB] よりも $PSNR$ 値が小さい、即ち歪みが大きくなったということが分かった。図 6.6 の B、即ち基準点の配置を考えた 2 次微分値による絞り込みの結果では、基準点数が 19 点までは $PSNR$ 値が 30.22[dB] と比較的に良い補正結果である。しかし、先ほどの条件の場合と同様に基準点数が 4 点の場合では $PSNR$ 値が 13.06[dB] となり、補正により歪みが大きくなった。基準点の配置を考慮し、隣接画素の 2 次微分値の平均値が 0 にどれくらい近いかを絞り込みの条件とした場合、即ち図 6.6 の C では、基準点数が 18 点において 31.05[dB] となり、基準点数を 9 点、7 点と絞り込んでいっても、それぞれ $PSNR$ 値は 30.99[dB]、27.01[dB] となり、GTPU 法による DEM を補正できていることが確認された。

次に、 $\hat{\rho}_{i,j}$ による絞り込み、即ち図 6.6 の D では、基準点数が 11 点において 32.40[dB] であり、7 点において 30.87[dB] と他の条件の絞り込みに対して非常に良い結果が得られることが分かった。従って、 $\rho_{i,j}$ よりも $\hat{\rho}_{i,j}$ により理想的な基準点の特徴が見いだせたと言える。ただし、 $\hat{\rho}_{i,j}$ の隣接画素での平均を条件とした図 6.6 の E では、 $\rho_{i,j}$ の隣接画素を考慮した場合は異なり、基準点数の減少に伴う精度の低下が著しく、望ましい結果は得られなかった。以上より、理想的な基準点の特徴が 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ と関係があり、隣接画素を考慮することにより理想的な基準点の特徴を捉えられることが分かった。また、2 次微分値 $\hat{\rho}_{i,j}$ は隣接画素の値を考慮せずに理想的な基準点の特徴を捉えることができるということも分かった。

6.5 考察

本章では、有効だと示された四基準点法をさらに実際の計測方法への応用を容易にするための実験を行った。まず、基準点の配置においては、GTPU 法において位相画像の軸方向に 1 次微分値が欠落するということに注目し、4 つの基準点を選んだ場合に 3 つの基準点はどの 2 つの基準点を選んでも画像の軸に平行であるということが妥当だと考えた。このことを踏まえて、4 つ目の基準点が 3 つの基準点で作られる長方形領域の外側から探し出せば、比較的精度の大きい結果が得られるということが分かった。そこで、以上の条件を基に位相画像より 4 点を選び出し、補正がどの程度有効であるのかを調べた。その結果、最も補正が有効であった場合では、 $PSNR$ 値が 33.79[dB] となり、全画素を基準点として補正した場合の 33.80[dB] に対して劣らない補正が行えることが分かった。即ち、理想的な基準点を選びさえすれば、4 点のみによる補正でも有効であることが示された。

続いて、四基準点法により補正が有効に行うことができた場合の基準点の共通する特徴を見いだすために、GTPU 法の解法に注目して、2 次微分値に関して調べ、その条件を絞り込みの条件として基準点数と補正精度の関係を調べた。その結果、GTPU 法で用いる 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ による絞り込みでは基準点の配置を考慮するかしないかはあまり関係がないことが分かったが、基準点の隣接画素における 2 次微分値は関係があると考えられる。これは、2 次微分値 $\rho_{i,j}$ が表している地形というものが、高度変化が一定であり、1 次成分により成る場所の基準点を選ぶことができるからであろう。図 6.6 の C において、基準点数が 5 点の場合においても補正が行われているということが確認できるからである。しかし、前述のように四基準点法の性質を考えると、画像の軸方向への性質が重要である。画像の軸を x 軸及び y 軸と想定すると、 x 軸方向及び y 軸方向に 2 次以上の成分で形成されている場所でもその微分値の正負が異なる場合では、 $\rho_{i,j}$ による絞り込みでは不適切だと考えられる。そこで、 x 軸方向及び y 軸方向の微分値の大きさを重視した $\hat{\rho}_{i,j}$ を定義し、この値を絞り込みの条件とした。その結果、基準点数が 11 点においても $PSNR$ 値が 32.40[dB] と非常に良い結果が得られた。また、基準点数が 7 点においても 30.87[dB] と適正に補正が行われている。この結果は、四基準点法の性質を考慮して予想した基準点に相応しい場所の性質が、実

際に基準点を選ぶ場所として適当だということを表している。

従って、四基準点法に基づいた理想的な基準点の選択方法として 2 次微分値を用いることは誤りではなく、また位相画像の 2 つの軸方向への微分値の大きさの和が小さいという条件を満たす場所より基準点を選ぶことで、四基準点法による補正を活かすことができる。

第 7 章：まとめ

InSAR システムを用いた地球規模の地形の調査に関する研究が近年注目されている。本論文では、地形の標高モデルを作成する際に必要である位相アンラッピングという方法で、広く有効であるとしられている GTPU 法の結果の補正方法として四基準点法を提案した。まず、提案した四基準点法が理論的に有効であるのかを確かめるために四基準点法が提唱する補正面の推定に対して、InSAR 位相画像の全画素を用いて計算を行った。その結果、四基準点法が有効であることが示された。続いて、位相画像より 4 つの基準点を選び出し、選ばれた基準点によって補正ができるのかを調べた。その結果、基準点の選び方により補正精度に差はあるが、実験を行ったどのような基準点の組み合わせにおいても補正が有効であることが確認された。

四基準点法が GTPU 法の結果の補正方法として有効であることは示されたが、実際の計測方法に対する応用を考える場合には、基準点の選び方に対して、明確な方法を見いだす必要がある。本論文では、次に、理想的な基準点がどのような特徴を持っているのかということ調べた。その結果、補正が有効である場合の基準点では、2 次微分値が 0 付近の値を取ることが分かり、また位相画像の軸方向での微分値の大きさに注目することにより、理想的な基準点の特徴を捉えたと言える結果が得られた。従って、四基準点法による補正が有効になる基準点の選択に関して一つの明確な方法が見いだせた。

謝 辞

本論文の作成にあたり、指導教官である廣瀬 明先生には非常にお世話になりました。研究生生活において、私が本論文を書き上げるまで至ったのは、廣瀬先生の指導であり、助言があったからこそだと思っております。また、研究生生活以外の面においても非常にお世話になったと思っております。この場を借りて感謝を述べさせていただきます。

また、研究室の皆様にも非常にお世話になりました。研究への熱意では、酒谷さん、川田さんに見習わなければならないことが多く、身が引き締まる思いでした。津田さん、加藤さん、馬場さん、濱野さんには修士の学生生活の上で大変お世話になりました。同期のアモンさん、小安君、原君、ボドロフ君には、良い意味で切磋琢磨して研究の励みになりました。修士の谷澤君、渡辺君及び、卒論生の東君、エリスさん、増山君には研究室生活を共に過ごせたことに感謝しています。そして、昨年の卒論生で他研究室に進学した浅野君、稲葉君、廣木君に対しても感謝しております。

最後に、私を支えてくれた家族や友人の皆様にも大いに感謝しています。以上、簡単ではありますが、皆様に対する感謝の意と致します。

参考文献

- [1] 岡本：“地球環境計測”，オーム社 (1999).
- [2] 関根：“レーダ信号処理技術”，電子情報通信学会 (1991).
- [3] H. A. Zebker, T. G. Farr, R. P. Salazar and T. H. Dixon: “Mapping the world’s topography using radar interferometry: The topsat mission”, PROCEEDINGS OF THE IEEE, Vol. 82, No. 12, pp. 1774–1786 (1994).
- [4] H. A. Zebker, J. Villasenor and S. N. Madsen: “Topographic mapping from ers-1 and seasat radar interferometry”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1992. IGARSS ’92. International, pp. 387–388 (1992).
- [5] N. H. Ching, D. Rosenfeld and M. Braun: “Two-dimensional phase unwrapping using a minimum spanning tree algorithm”, IEEE TRANSACTION ON IMAGE PROCESSING, pp. 355–365 (1992).
- [6] S. Kobayashi, N. Fujii and S. Okubo: “Detection of volcano deformation and coseismic movements using jers-1 l-band sar differential interferometry; combination with other geodetic measurements”, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS ’99 Proceedings. IEEE 1999 International, Vol. 2, pp. 800–802 (1999).
- [7] N. Fujii, S. Kobayashi, T. Sakurai-Amano, S. Okubo and A. Mio: “Crustal movement imaging by d-insar, reflector array, dense gps, leveling and gravity changes in the plate convergent zone, at the tokai region, central japan”, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS ’99 Proceedings. IEEE 1999 International, Vol. 2, pp. 797–799 (1999).
- [8] T. Strozzi, U. Wegmueller, C. L. Werner, A. Wiesmann and V. Spreckels: “Jers sar interferometry for land subsidence monitoring”, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 41, No. 7, pp. 1702–1708 (2003).
- [9] A. B. Suksmono and A. Hirose: “Adaptive noise reduction of insar images based on a complex-valued mrf model and its application to phase unwrapping problem”, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 40, No. 3, pp. 699–709 (2002).
- [10] G. Nico, G. Palubinskas and M. Datcu: “Bayesian approaches to phase unwrapping : Theoretical study”, IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, pp. 2545–2556 (2000).
- [11] A. Refice, et al.: “Local and global strategies for insar phase unwrapping”, Proceedings of SPIE, Volume 3497, pp. 134–145 (1998).
- [12] M. Shimada and H. Hirosawa: “Slope corrections to normalized rcs using sar interferometry”, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 38, No. 3, pp. 1479–1484 (2000).

- [13] A. B. Suksmono and A. Hirose: “Interferometric sar image restoration using monte carlo metropolis method”, *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, Vol. 50, No. 2, pp. 290–298 (2002).
- [14] 岩本, 藤坂, 佐藤, 原: “インタフェロメトリック SAR の位相アンラッピングアルゴリズム”, *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J82-B, No.3, pp. 435–441 (1999).
- [15] J. J. Akerson, Y. E. Yang, Y. Hara, B.-I. Wu and J. A. Kong: “Automatic Phase Unwrapping Algorithms in Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry”, *IEICE TRANS. ELECTRON*, Vol. E83-C, No. 12, pp. 1896–1904 (2000).
- [16] J. R. Buckland, J. M. Huntley and S. R. E. Turner: “Unwrapping noisy phase maps by use of a minimum-cost-matching algorithm”, *APPLIED OPTICS*, pp. 5100–5108 (1995).
- [17] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt: “Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software”, *JOHN WILEY & SONS, INC* (1998).
- [18] F. H. Ahmad, G. L. Helms, R. M. Castellane and B. P. Durst: “A discrete phase-unwrapping technique for interferograms”, *MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS*, Vol. 32, No. 2, pp. 101–104 (2002).
- [19] H. A. Zebker and Y. Lu: “Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms”, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 15, Issue 3, pp. 586–598 (March).
- [20] A. B. Suksmono and A. Hirose: “Recursive transform-based phase unwrapping”, *2003 International Conference on Image Processing (ICIP) 2003. Proceedings*, Vol.3, pp. III–145–148 (2003).
- [21] W. Xu and I. Cumming: “A Region-Growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping”, *IEEE TRANSACTION ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 37, No. 1, pp. 124–134 (1999).
- [22] G. Fornaro and E. Sansosti: “A Two-Dimensional Region Growing Least Squares Phase Unwrapping Algorithm for Interferometric SAR Processing”, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 37, No. 5, pp. 2215–2226 (1999).
- [23] C. Mario, F. Alfonso and Z. Francesco: “A Fast Phase Unwrapping Algorithm for SAR Interferometry”, *IEEE TRANSACTION ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, pp. 452–460 (1999).
- [24] A. B. Suksmono and A. Hirose: “Adaptive complex-amplitude texture classifier that deals with both height and reflectance for interferometric sar images”, *IEICE TRANS. ELECTRON.*, Vol. E83-C, No. 12, pp. 1912–1916 (2000).

目 次

2.1	InSAR システムの簡単な概略図: 2つのアンテナが近い距離に人工衛星等に搭載されている。それぞれ同一地点からの反射を受信する。	4
3.1	位相特異点の例: 観測される位相値が $(-0.5, 0.5]$ である場合に A 地点と B 地点の高度差が積分経路により異なる。このような点を位相特異点という。	6
3.2	Residue の再結合: 白い丸と黒い丸はそれぞれ正、負の Residue	7
3.3	Goldstein のアルゴリズムの処理 (a) 正および負の Residue (b) 走査すべき 3×3 の box (c) 走査すべき 5×5 の box および Residue 間に生成される branch-cut (暗い画素) [17]	8
3.4	3 つ目の Residue が存在する場合の Goldstein のアルゴリズムの処理 (a) 右側に新たな Residue への線ができる (b) 矢印で示される Residue に新しい Residue を 2 番目の branch-cut (暗い画素) で結合する (c) (b) において矢印で示される Residue と画像の端を branch-cut で結合する [17]	8
3.5	隣接リスト (a) アンラップされた薄い色の画素 (b) 暗い色の画素をつなぐ隣接リスト (c) リストより 2 行 3 列目の画素が選ばれたときは、図のように隣接リストを更新する [17]	9
3.6	$0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq N$ の範囲に定義される関数 $f_{i,j}$ の正反射の例。まず最初に $i = M$ の線に対して関数を反射させ、次に $j = N$ の線に対して反射させる。 [17]	11
3.7	位相の積分経路を予想した時の Growth 画素とその近傍画素 [21]	13
5.1	InSAR 位相画像: (a) 山頂付近 (b) 斜面	21
5.2	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた GTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	21
5.3	斜面の InSAR 位相画像を用いた GTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	22
5.4	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた RTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	22
5.5	斜面の InSAR 位相画像を用いた RTPU 法の結果: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	23
5.6	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	24
5.7	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点を x 方向に 2 点選んだ場合を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	24
5.8	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点を y 方向に 2 点選んだ場合を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	25
5.9	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	25
5.10	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 4 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	26
5.11	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点 1 点を想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分	26
5.12	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点を x 方向に 2 点選んだと想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分	27

5.13	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点を y 方向に 2 点選んだと想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分	27
5.14	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点 3 点を想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分	28
5.15	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の基準点 4 点を想定した (a) 補正面 (b) 補正後の GTPU 結果と RTPU 結果との差分	28
5.16	斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	29
5.17	斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	30
5.18	斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 4 点を想定した補正: (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	30
5.19	斜面の InSAR 位相画像を用いた RTPU 結果と 基準点を (a) 1 点、(b) 3 点、(c) 4 点と想定した場合の補正結果との差分	31
5.20	基準点の選び方	32
5.21	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	34
5.22	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	34
5.23	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	35
5.24	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の RTPU 結果と GTPU 結果を基準点 (a) 1 点、(b) 4 点で補正した結果との差分	35
5.25	斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 1 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	36
5.26	斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 3 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	37
5.27	斜面の InSAR 位相画像を用いた基準点 4 点による補正後の (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	37
5.28	斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の RTPU 結果と GTPU 結果を基準点 (a) 1 点、(b) 3 点 (c) 4 点で補正した結果との差分	38
6.1	3 つの基準点と線分 A、B、C、D 上の 4 番目の基準点	41
6.2	線分 A 上の $PSNR$ 値の変化の様子	41
6.3	線分 B、C、D 上の $PSNR$ 値の変化の様子	41
6.4	最も補正が有効であった結果: $PSNR = 33.786[\text{dB}]$ (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像及び、全画素を用いた補正: $PSNR = 33.798 [\text{dB}]$ (a) DEM (b) 再度折り畳んだ画像	43
6.5	注目している画素とその隣接画素	45
6.6	絞り込んだ基準点における数と $PSNR$ 値との関係 条件は A:2 次微分値 $\rho_{i,j}$ のみ B: 基準点の配置を考えた 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ C: 配置を考えた隣接画素の 2 次微分値 $\rho_{i,j}$ D: 基準点の配置を考えた 2 次微分値 $\hat{\rho}_{i,j}$ E: 配置を考えた隣接画素の 2 次微分値 $\hat{\rho}_{i,j}$ D: 未補正の場合	46

表 目 次

3.1	1024 × 1024 のピクセルサイズの画像を IBM RS/6000 workstation にて位相アンラッピングを行った場合に要するメモリ及び平均実行時間	16
5.1	式 (4.1) に基づいた基準点数と補正面との関係	20
5.2	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係	23
5.3	斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係	29
5.4	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係 : $t = 1, 3, \dots, 27$	33
5.5	山頂付近の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係 : $t = 25$	33
5.6	斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係 : $t = 1, 3, \dots, 27$	36
5.7	斜面の InSAR 位相画像を用いた場合の PSNR 値と基準点数との関係 : $t = 27$	36
6.1	PSNR 値による補正精度 : 上位 10 組及び下位 5 組	42
6.2	InSAR 位相画像の 2 次微分値	44

発表文献

- <1> 大石 豪, Andriyan Bayu Suksmono, 廣瀬 明 “四基準点法の提案：グローバル・トランスフォーム・位相アンラッピングにより得られるデジタル・エレベーション・マップの補正法” 電気学会研究会資料, EMT-04-75, September, 2004, pp. 25-30

[投稿中]

- <2> Takeshi Oishi, Andriyan Bayu Suksmono, Akira Hirose “Four Reference-Point Method: A Compensation Method of Distortion in Global Transform Phase Unwrapping Process” IEEE TRANSACTION ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING
- <3> “Proposal of Four Reference-Point Method to Compensate the Distortion in Global Transform Phase Unwrapping Process” International Geoscience and Remote Sensing Symposium