

ステレオビジョンに基づく SAR強度画像からの3次元計測

丸木 大樹¹ 酒井 修二¹ 伊藤 康一¹ 青木 孝文¹ 上本 純平² 浦塚 清峰²

概要: 本稿では、2枚の合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) 強度画像から地表面の3次元計測を行う手法を提案する。SARの性質を利用してSAR画像から3次元計測を行う手法がリモートセンシングの分野で提案されているが、航路が限定されたり、高精度化のために地上基準点を必要としたりする。一方で、コンピュータビジョンの分野では、複数枚のカメラ画像を用いて3次元復元を行う手法が数多く提案されている。SAR画像をカメラ画像と同等に扱うことができれば、コンピュータビジョンの原理に基づいて複数の航路で取得されたSAR画像から3次元計測を行うことができる。具体的には、SARの計測モデルから導出されるレーダ画像投影モデルを用いることで、SAR画像間のステレオマッチング、三角測量に基づく3次元計測、そして、バンドル調整による最適化を行う。また、提案手法により求めた3次元点と航空レーザ測量により取得した数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) との比較を行い、提案手法の精度を評価する。

1. はじめに

地球温暖化や大規模自然災害のような地球規模の問題に対処するために、リモートセンシング技術を用いた地球観測が行われている。人口衛星や航空機を用いたリモートセンシングでは、カメラのような受動型センサ、あるいは、レーダのような能動型センサが用いられる。光学センサであるカメラは、簡便に観測を行うことができるが、受動型センサであるため夜間に使用することができない大きな欠点がある。一方で、レーダは、能動型センサであるため昼夜問わずに観測することができたり、マイクロ波の透過特性から雲、霧、雨などの天候の影響を受けることなく観測できる利点がある。本稿では、高い空間分解能とその有用性から重要なセンサとして注目されている合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) に着目する [1]。

SARは、電磁波を用いて地表面の画像を生成するイメージングレーダの一種であり、人工衛星や航空機などの移動物体 (プラットフォーム) にセンサを搭載して、移動しながら地表面などを観測する。センサ搭載プラットフォームの移動によるドップラーシフトを利用した開口合成技術を適用する事で、SARは他のイメージングレーダと比べて高

い空間分解能を持つ点の特徴として挙げられる [1]。SARで取得されるデータは地表面等から後方散乱された反射波の強度、および、位相である。この受信信号の振幅と位相情報は、波を表現しており、データ取得時のセンサ間距離等に制約はあるものの、複数のデータを干渉させることができる。この干渉を利用して地形変動や標高を計測する干渉SAR (Interferometric SAR: InSAR) が提案されている [2]。InSARは、SARを用いて観測された同一地域の二つのデータの干渉から計算した位相差に基づいて地形の変動や標高を観測する。位相差を用いているため、生成される干渉縞の位相は、 2π の不定性を持つ。また、軌道情報の不確かさから地表が平らな場合でも軌道縞と呼ばれる干渉縞が生じる問題がある。地形図を作成するためには、軌道縞を除去する必要があるが、完全に除去することが困難であり、除去できたとしても計測精度が低下してしまう場合も多い。

コンピュータビジョンの分野では、複数枚のカメラ画像を用いて3次元計測を行う手法が数多く提案されている [3-6]。SAR画像をカメラ画像のように扱うことができれば、コンピュータビジョンの原理に基づいて、複数の航路で取得したSAR画像から3次元計測を行うことが可能である。しかし、SAR画像とカメラ画像とでは画像生成プロセスが異なるため、カメラ画像を用いた3次元計測手法を直接SAR画像に適用することができない。そこで、本稿では、SAR画像をカメラ画像と同様に扱うためにSAR

¹ 東北大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University,
Sendai-shi, Miyagi, 980-8579, Japan

² 情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications
Technology, Koganei-shi, Tokyo, 184-8795, Japan

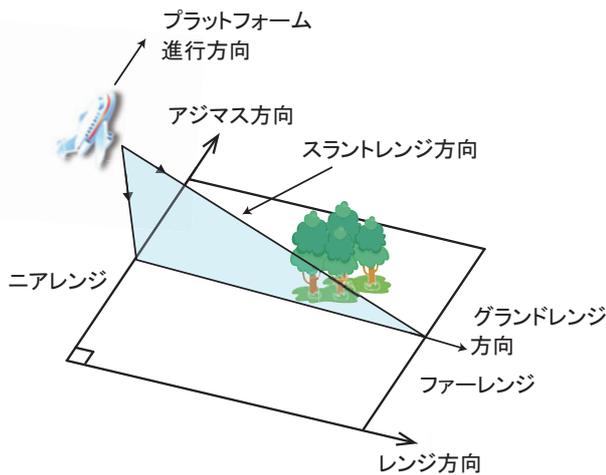


図 1 SAR 観測用語

の幾何学的関係を定式化し、コンピュータビジョンの原理に基づいて 3 次元計測を行う手法を提案する。具体的には、SAR の画像生成プロセスをレーダ画像投影モデルとして導出し、SAR における内部・外部パラメータの定義を行う。これにより、三角測量に基づく 3 次元計測、バンドル調整によるパラメータの最適化を可能とする。提案手法は、InSAR による標高計測とは異なり、位相情報を利用しないので、位相を利用することによる問題点 (2π の不定性、軌道縞の問題、プラットフォームの軌道制約) を回避しつつ、3 次元計測を行うことが可能である。また、本稿では、国土地理院によって公開されている数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を用いた性能評価実験により、提案手法の 3 次元計測精度を定量的に評価する。

2. SAR 画像の生成と特徴

SAR を用いて地表面を計測した信号から画像を生成するための原理と SAR 画像の特徴について述べる。図 1 に、本稿で用いる SAR 観測の基本的な用語の説明図を示す。レーダを搭載する人工衛星や航空機をプラットフォーム、プラットフォームの進行方向をアジマス方向、進行方向と直角でマイクロ波を照射する方向をレンジ方向と呼ぶ。さらに、レンジ方向は、マイクロ波が照射される方向に対するスラントレンジ方向と、地表面を基準としたグラウンドレンジ方向に区別される。また、マイクロ波が照射される領域で、アンテナに近い側をニアレンジ、遠い側をファーレンジと呼ぶ。

2.1 SAR 画像の生成

レーダの強度信号から画像を生成する原理について説明する。プラットフォームからレンジ方向にマイクロ波パルスを送信し、地表面で後方散乱された反射波を受信する。この一連の動作を、アジマス方向に移動しながら繰り返すことによって 2 次元平面を走査する。図 2 に受信信号の

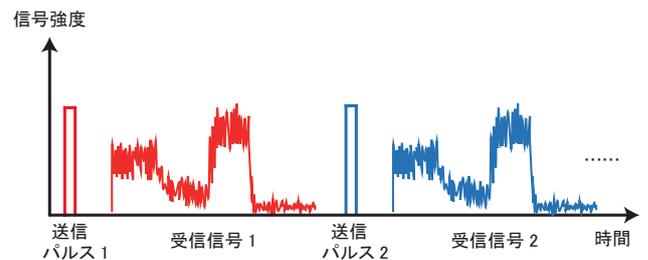


図 2 地表面からの反射波 (1 次元受信信号)

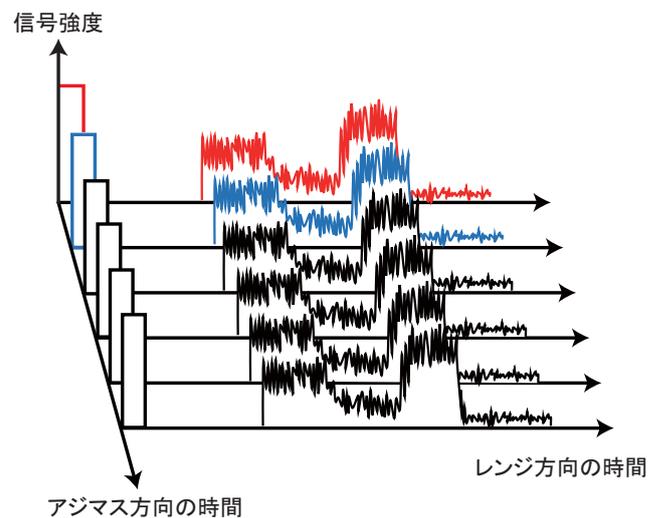


図 3 反射波を並べることで生成された 2 次元画像 (2 次元受信信号)

例を示す。そして、1 次元時間関数として表される受信信号を、それぞれの送信信号からの遅れに関する時間関数として並べ替えることにより 2 次元画像を生成する。図 3 に生成した 2 次元画像の例を示す。各画素の輝度値が受信信号の振幅 (強度) であるため、生成された画像は、レーダ強度画像と呼ばれる。

実際には、SAR では分解能を高めるために、アジマス方向、レンジ方向のそれぞれについて開口合成、パルス圧縮等の圧縮処理を行う必要がある。圧縮処理の詳細については、文献 [1] を参照されたい。

2.2 SAR 画像の特徴

SAR 画像には、画像の生成プロセスに起因するいくつかの特徴として、(i) アジマス方向とレンジ方向で分解能が必ずしも同一ではないこと、(ii) レーダ観測特有の画像変調が生じていることが挙げられる [1]。

一般に、SAR は、使用可能な観測信号の周波数バンド幅の制限によりレンジ方向に比べアジマス方向の分解能が高い。また、レンジ方向では、ニアレンジ側からファーレンジ側にかけて分解能が向上していく。そのため、生成された SAR 画像は、地表面を斜め上空から見たような画像となる。実際の地表面と対応させるためには、画像全体の分解能を揃え、地表面を真上から見たような俯瞰画像に変換する必要がある。なお、俯瞰画像への変換を地上投影変

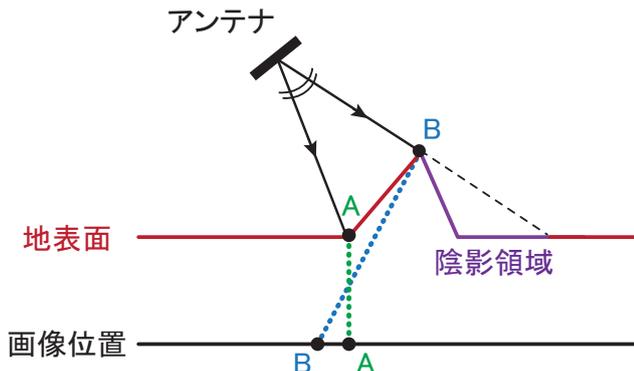


図 4 SAR 画像においてジオメトリック画像変調が発生するメカニズム

換，地上投影変換前の画像をスラントレンジ画像，地上投影変換後の画像をグランドレンジ画像と呼ぶ。

SAR 画像特有の画像変調は，SAR の幾何学的効果としてジオメトリック画像変調と呼ばれる。ジオメトリック画像変調には，フォアショートニング，レイオーバー，陰影効果がある。

● フォアショートニング，レイオーバー

SAR は，マイクロ波を斜め下方向に照射し，地表面に散乱されて戻ってきた順に反射波を記録する。そのため，プラットフォームまでの距離が短い地点ほど，プラットフォーム側の画像上に投影される。同じ水平位置でも標高が高いほどプラットフォームまでの距離が短くなるため，高さがある物体は，本来の位置よりプラットフォーム側に投影される。この現象をフォアショートニングと呼ぶ。フォアショートニングがさらに大きくなると，図 4 に示す散乱体 A と B のように，本来の位置関係と逆転して画像上に投影されてしまう。この現象をレイオーバーと呼ぶ。フォアショートニング，レイオーバーは，対象物の高さや，レーダの入射角の大きさに依存する。

● 陰影効果

図 4 のように，高さがある物体によってマイクロ波が遮られると，散乱体 B より後ろ側の領域には，マイクロ波が照射されない。そのため，この領域からの受信信号強度は 0 となり，SAR 画像上に影のように映ってしまう。この現象を陰影効果と呼ぶ。レーダ入射角が大きくなるにつれて陰影領域が増加するが，フォアショートニングが小さくなる。そのため，SAR 画像の利用目的に合わせ，適切な入射角を選択して観測を行う必要がある。

3. SAR の 3 次元幾何の定式化

コンピュータビジョンの原理に基づいて 3 次元計測を行うために，コンピュータビジョンの分野における解法に合わせて SAR の 3 次元幾何を定式化する。まず，3 次元空

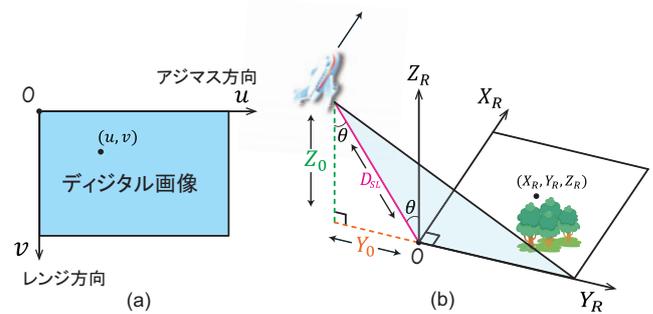


図 5 座標系の定義：(a) デジタル画像座標系，(b) レーダ座標系

間上の物体が 2 次元レーダ画像上にどのように投影されるかを記述する投影モデルと SAR の内部パラメータを定義する。次に，異なる航路で同一の領域を SAR で観測した場合の SAR の外部パラメータを定義する。最後に，2 枚のレーダ強度画像の対応関係と SAR の 3 次元幾何に基づいて，地表面の 3 次元形状を求めるための理論式を導出する。

3.1 レーダ画像投影モデルと SAR の内部パラメータ

レーダ画像投影モデルを定義するために 3 次元空間と 2 次元空間のそれぞれの位置を表す座標系 (図 5) を導入する。2 次元空間の座標系には，原点を画像左上とし，アジマス方向を水平軸 u ，レンジ方向を垂直軸 v とするデジタル画像座標系を用いる。3 次元空間の座標系には，コンピュータビジョンの分野で用いられるカメラ座標系にならって，レーダ座標系と呼ぶ新たな座標系を導入する。レーダ座標系では，デジタル画像座標系の原点に対応する 3 次元空間位置の標高 0 m の点を原点とし，アジマス方向を X_R 軸，レンジ方向を Y_R 軸，高さを Z_R 軸とする。このとき，2 節で述べた SAR による画像生成プロセスを考慮すると，レーダ座標系で表される 3 次元空間上の点 (X_R, Y_R, Z_R) とその投影点 (u, v) との間に次式で表される投影モデルが定義できる。

$$u = \alpha_u X_R \quad (1)$$

$$v = \alpha_v (\sqrt{(Y_0 + Y_R)^2 + (Z_0 - Z_R)^2} - D_{SL}) \quad (2)$$

ここで， Y_0 はプラットフォームから原点までの水平距離， D_{SL} はプラットフォームから原点までのスラントレンジ距離， Z_0 はプラットフォームの高度を表す。また， α_u と α_v は，それぞれアジマス方向とスラントレンジ方向に関する分解能の逆数を表す定数である。 Y_0 と D_{SL} は， Z_0 とレーダ入射角 θ を用いて以下の式で表すことができる。

$$Y_0 = Z_0 \tan \theta \quad (3)$$

$$D_{SL} = \frac{Z_0}{\cos \theta} \quad (4)$$

以上より，レーダ画像投影モデルを記述するために必要な定数は， Z_0 ， θ ， α_u ， α_v の 4 つである。本稿では，この 4 つ

の定数を SAR の内部パラメータと定義する. 式 (1) はアジマス方向の画像投影位置を表し, 式 (2) はレンジ方向の画像投影位置を表す. 2.1 節で述べたように, SAR によるアジマス方向の画像生成は, 1 次元時間関数として表される受信信号を, 送信信号から遅れの時間の関数として並べ替えることによって行われる. つまり, 式 (1) が示すように, デジタル画像座標 u は, 単純にレーダ座標 X_R の定数倍で表現することができる. 一方で, レンジ方向の画像投影位置は, プラットフォームから対象物までのスラントレンジ距離によって決定される. 式 (2) の第一項は, プラットフォーム $(X_R, -Y_0, Z_0)$ から (X_R, Y_R, Z_R) 座標上の物体までの距離 $\sqrt{(Y_0 + Y_R)^2 + (Z_0 - Z_R)^2}$ を表している. 第一項から第二項 D_{SL} を引くことにより, $(X_R, Y_R, Z_R) = 0$ のときに $(u, v) = 0$ となり, レーダ座標系とデジタル画像座標系の原点が一致する.

3.2 座標系間の変換式と SAR の外部パラメータ

異なる 2 つの航路で同一の領域を観測した場合を考える. 一方の航路を航路 1 とし, もう一方を航路 2 とする. この時, それぞれの航路で定義されるレーダ座標系における座標 \mathbf{M}_{R1} と \mathbf{M}_{R2} との間で次式が成り立つ.

$$\mathbf{M}_{R1} = \mathbf{R}\mathbf{M}_{R2} + \mathbf{t} \quad (5)$$

ここで, \mathbf{M}_{Ri} ($i = 1, 2$) は航路 i におけるレーダ座標系の 3 次元座標, \mathbf{R} は回転角 ϕ の 3×3 回転行列, \mathbf{t} は並進ベクトルであり, それぞれ次式で表される.

$$\mathbf{M}_{Ri} = \begin{bmatrix} X_{Ri} \\ Y_{Ri} \\ Z_{Ri} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし, \mathbf{R} は Z_R 軸まわりの回転を表し, \mathbf{t} の Z_R 軸方向の並進は 0 である. レーダ座標系は, 原点を標高 0 m の点とし, 高さ方向に Z_R 軸をとり, Z_R 軸と直角方向に, X_R 軸, Y_R 軸をとると定義した. そのため, どのような航路をとった場合でも, レーダ座標系間の変換は, Z_R 軸まわりの回転と, X_R, Y_R 軸方向の並進のみで表現することができる. 本稿では, 式 (5) が示す座標系間の変換式を記述するために必要な \mathbf{R} と \mathbf{t} を SAR の外部パラメータと定義する.

3.3 3 次元計測の理論式

レーダ画像投影モデルと航路毎に設定されるレーダ座標系間の変換式を用いて 3 次元計測の理論式を導出する.

式 (1) と式 (2) のレーダ画像投影モデルを X_R と Y_R について解き直すと次式が得られる.

$$X_R = \frac{u}{\alpha_u} \quad (8)$$

$$Y_R = \sqrt{\left(\frac{v}{\alpha_v} + D_{SL}\right)^2 - (Z_0 - Z_R)^2} - Y_0 \quad (9)$$

また, 式 (5) から次式が導かれる.

$$X_{R1} = X_w \cos \phi - Y_w \sin \phi + t_x \quad (10)$$

$$Y_{R1} = X_w \sin \phi + Y_w \cos \phi + t_y \quad (11)$$

$$Z_{R1} = Z_w \quad (12)$$

ここで, 基準の座標系として, 航路 2 のレーダ座標系 \mathbf{M}_{R2} を世界座標系 $\mathbf{M}_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$ とした. 式 (10) に式 (8) と式 (9) を代入し, 高さ Z_w に関する以下の式を導出する.

$$Z_w = Z_{02} \pm \frac{1}{\sin \phi} \sqrt{B^2 - A^2} \quad (13)$$

ただし,

$$A = -\frac{u_1}{\alpha_{u1}} + \frac{u_2}{\alpha_{u2}} \cos \phi + Y_{02} \sin \phi + t_x \quad (14)$$

$$B = \left(\frac{v_2}{\alpha_{v2}} + D_{SL2}\right) \sin \phi \quad (15)$$

である. ここで, (u_1, v_1) と (u_2, v_2) は, 各航路におけるスラントレンジ画像上の対応点である. α_{ui} , α_{vi} , Y_{0i} , Z_{0i} , D_{SLi} は, それぞれ航路 i における α_u , α_v , Y_0 , Z_0 , D_{SL} を表している. また, X_w と Y_w は, 式 (8) と式 (9) により次のように表すことができる.

$$X_w = \frac{u_2}{\alpha_{u2}} \quad (16)$$

$$Y_w = \sqrt{\left(\frac{v_2}{\alpha_{v2}} + D_{SL2}\right)^2 - (Z_{02} - Z_w)^2} - Y_{02} \quad (17)$$

以上のように導出された X_w , Y_w , Z_w に関する式 (13), (16), (17) が \mathbf{M}_{R2} を世界座標系とした場合の 3 次元計測の理論式である. \mathbf{M}_{R1} を世界座標系とした場合は, 式 (5) を

$$\mathbf{M}_{R2} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{M}_{R1} - \mathbf{R}^{-1}\mathbf{t} \quad (18)$$

と変形し, 新たに $\mathbf{R}' = \mathbf{R}^{-1}$, $\mathbf{t}' = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{t}$ と置くことで, 同様に解くことが可能である. \mathbf{M}_{R1} を世界座標系とした場合の 3 次元計測理論式は以下ようになる.

$$X_w = \frac{u_1}{\alpha_{u1}} \quad (19)$$

$$Y_w = \sqrt{\left(\frac{v_1}{\alpha_{v1}} + D_{SL1}\right)^2 - (Z_{01} - Z_w)^2} - Y_{01} \quad (20)$$

$$Z_w = Z_{01} \pm \frac{1}{\sin \phi} \sqrt{B^2 - A^2} \quad (21)$$

ただし,

$$A = \frac{u_2}{\alpha_{u2}} + \left(t_x - \frac{u_1}{\alpha_{u1}}\right) \cos \phi + (Y_{01} + t_y) \sin \phi \quad (22)$$

$$B = \left(\frac{v_1}{\alpha_{v1}} + D_{SL1} \right) \sin \phi \quad (23)$$

このように、世界座標系が M_{R1} と M_{R2} の場合それぞれにおいて、3次元計測の理論式が導出される。

以上のように導出された3次元計測の理論式を利用するためには、一般的なステレオビジョンと同様に、異なる航路で取得された2枚のSAR画像の対応関係とSARの内部、および、外部パラメータ値を求めることが必要である。

4. レーダ強度画像からの地表面の3次元計測

レーダ強度画像間の対応関係とSARの3次元幾何に基づいて3次元計測を行う手法を提案する。提案手法は、(i) 地上投影変換、(ii) 外部パラメータの推定と画像マッチング、(iii) 内部・外部パラメータの最適化、(iv) 3次元計測の4つの処理で構成される。図6に、スラントレンジ画像間の対応点を取得するまでのフローを示す。以下では、それぞれの処理について具体的に説明する。

4.1 地上投影変換

SAR画像は、2節で述べたように、画像全体で分解能が変化しており、実際の地表面の見え方と異なる。航路によって被写体の映り方の違いが大きくなるため、そのままでは画像マッチングを行うことが困難である。そこで、地上投影変換により画像全体の分解能を揃えて俯瞰画像に変換することで、画像間の大きな変形を解消する。 (u, v) を地上投影変換前のスラントレンジ画像上の点とし、 (X_R, Y_R) を地上投影変換後のグラウンドレンジ画像上の点とする。この時、地上投影変換式は、2節で定義したレーダ画像投影モデルである式(1)と式(2)で表すことができる。ただし、 Z_R は任意の定数であるとする。本稿では $Z_R = 0$ とした。この地上投影変換式により、航路1と航路2のスラントレンジ画像をそれぞれのグラウンドレンジ画像へ変換する。

4.2 外部パラメータの推定と画像マッチング

グラウンドレンジ画像から外部パラメータの推定と画像マッチングを行う。外部パラメータである回転行列 R と並進ベクトル t は、 Z 方向の回転と並進が0である。これを利用することで、2次元のグラウンドレンジ画像間の回転量と平行移動量から外部パラメータを求めることができる。本稿では、画像間の回転量推定に回転不変位相限定相関法 (Rotation-invariant Phase-Only Correlation: RIPOC) を、並進移動量の推定にPOCを用いる[7]。POCは、並進移動のみの画像変形を仮定している手法であるため、はじめにRIPOCを用いて画像間の回転角度を求める。そして、航路2の画像を回転補正してからPOCを用いて画像間の並進移動量を求める。次に、航路1のグラウンドレンジ画像と、回転補正した航路2のグラウンドレンジ画像との間で画像マッチングを行う。航路1のグラウンドレンジ画像上

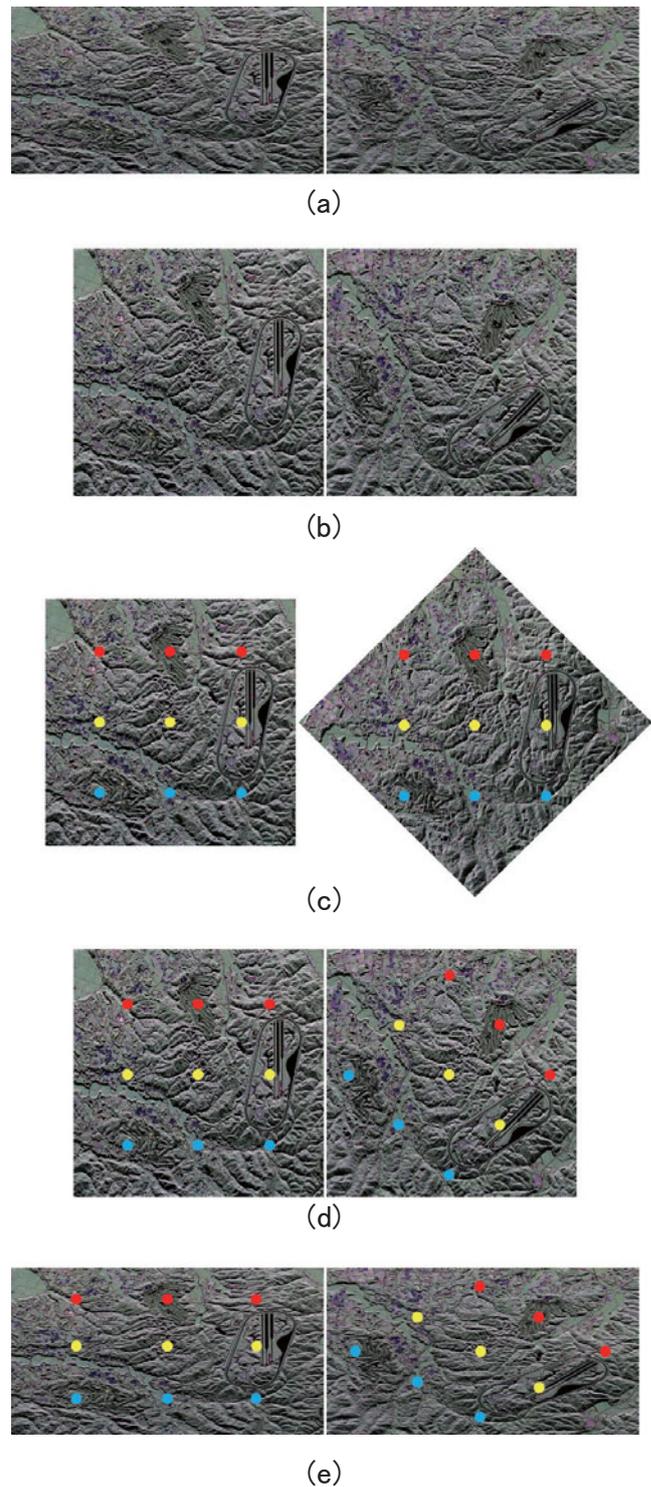


図6 スラントレンジ画像の地上投影変換から画像マッチングまでの処理フロー: (a) ステレオスラントレンジ画像ペア, (b) 地上投影変換後のグラウンドレンジ画像, (c) 外部パラメータの推定と画像マッチング, (d) グラウンドレンジ画像間の対応点の取得, (e) スラントレンジ画像間の対応点の取得

に基準点を配置し、回転補正した航路2のグラウンドレンジ画像上の対応点をPOCに基づく対応点探索[8]を用いて求める。得られた対応点を回転補正前の座標系に戻すことで、航路1と航路2のグラウンドレンジ画像上での対応点を

表 1 Pi-SAR2 の撮影諸元

No.	撮影日時	高度 Z_0 [m]	入射角 θ [deg.]	1/分解能 [pixel/m]	
				α_u (アジマス方向)	α_v (スラントレンジ方向)
1	2011/08/22	8,897	47.25	4	2.67
2	2011/08/22	8,902	43.87	4	2.67

得ることができる。最後に、グラントレンジ画像間の対応点ペアに、地上投影変換と逆の変換を行うことで、各航路のスラントレンジ画像上の対応点を求める。

4.3 パラメータの最適化と 3 次元計測

グラントレンジ画像間の回転角度と平行移動量から求めた外部パラメータは、厳密に正しい値ではない。地上投影変換で $Z_R = 0$ を仮定しているため、画像間の平行移動量に、航路の違いによる平行移動量とジオメトリック画像変調による平行移動量が含まれてしまい、両者の区別がつかないことが原因である。そこで、バンドル調整に基づく再投影誤差の最小化により、内部および外部パラメータの最適化を行う。

最適化を行う内部および外部パラメータを \mathbf{P} 、各航路におけるスラントレンジ画像上の N 個の対応点ペアを $m_{1,i} = (u_1, v_1)_i$ 、 $m_{2,i} = (u_2, v_2)_i$ ($1 \leq i \leq N$) とする。このとき、次式で定義されるコスト関数 $E(\mathbf{P})$ の最小化を行う。

$$E(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N (\|m_{1,i} - m_{\text{rep}1,i}(\mathbf{P})\|^2 + \|m_{2,i} - m_{\text{rep}2,i}(\mathbf{P})\|^2) \quad (24)$$

ここで、 $m_{\text{rep},i}(\mathbf{P})$ は、対応点ペア $m_{1,i}$ 、 $m_{2,i}$ とパラメータ \mathbf{P} を用いて、3次元計測の理論式に基づいて復元した3次元点をレーダ画像投影モデルにより再度2次元平面に投影した点の座標 $(u_{\text{rep},i}, v_{\text{rep},i})$ を表す。また、 $m_{\text{rep}1,i}(\mathbf{P})$ は、航路1のスラントレンジ画像上に再投影した点の座標を表し、 $m_{\text{rep}2,i}(\mathbf{P})$ は、航路2のスラントレンジ画像上に再投影した点の座標を表す。

3節で述べたように、3次元計測の理論式は、どちらの航路で定義されるレーダ座標系を世界座標系にするかで異なる式となる。そこで、航路 i を世界座標系として定義した場合の3次元計測の理論式を利用して求めたコスト関数を $E_i(\mathbf{P})$ とする。このとき、最小化を行うコスト関数 $E(\mathbf{P})$ を以下のように定義する。

$$E(\mathbf{P}) = E_1(\mathbf{P}) + E_2(\mathbf{P}) \quad (25)$$

式 (25) で定義されるコスト関数は非線形関数である。そのため、非線形最小二乗アルゴリズムの1つである Levenberg-Marquardt 法によりコスト関数の最小化を行う。そして、コスト関数 $E(\mathbf{P})$ が最小となるときのパラメータ \mathbf{P} を最適化されたパラメータとして用いる。

以上により求めた内部および外部パラメータとスラント

レンジ画像間の対応点ペアを用いて、式 (19)、(20)、(21) に基づいて 3 次元計測を行う。

5. 精度評価実験と考察

本稿で提案する 2 枚の SAR 画像から 3 次元計測を行う手法の計測精度を国土地理院より公開されている数値標高モデルと比較することで評価する。

5.1 データセット

本実験で用いる SAR 画像は、情報通信研究機構 (National Institute of Information and Communications Technology: NICT) が開発した航空機 X バンド SAR である Pi-SAR2 により取得されたものである。観測場所は茨城県東茨城郡城里町であり、観測領域はおよそ $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ である。本実験で使用した SAR 画像を図 7 に示す。SAR 画像の大きさは、図 7 (a) が $20,000 \times 10,713$ ピクセル、図 7 (b) が $20,000 \times 10,338$ ピクセルである。これらの SAR 画像を取得したときの Pi-SAR2 の撮影諸元を表 1 に示す。

5.2 実験方法

まず、提案手法を用いて 2 枚の SAR 画像から地表面の 3 次元計測を行う。そして、復元した 3 次元点群と、真値である DEM の 3 次元メッシュモデルを ICP (Iterative Closest Point) により位置合わせをし、標高の残差で評価する。国土地理院によって公開されている DEM は、航空レーザ測量によって計測したデータから、建物および橋などの人工構造物や樹木などの植生をフィルタリング処理によって除去し、5 m 間隔に標高を内挿補間して求めた数値標高モデルデータである。提案手法によって求められる 3 次元点群が 1 m 間隔であるのに対し、DEM は 5 m 間隔の点群である。そのため、3 次元点群である DEM をドローネー三角形分割により 3 次元メッシュに変換して精度評価を行う。提案手法の地上投影変換では、約 $20,000 \times 10,000$ ピクセルの画像を $5,000 \times 5,000$ ピクセルの画像へと変換する。観測領域は $5,000 \times 5,000 \text{ m}$ であるため、画像全体の分解能は、1 ピクセルあたり 1 m である。内部パラメータは、既知であるとし、表 1 の値を用いる。POC に基づく画像マッチングのウィンドウサイズは、 128×128 ピクセルとする。画像マッチングを行う領域は、2 つの SAR 画像間で共通する領域でなければならない。そこで、基準点は、 $5,000 \times 5,000$ ピクセルの画像の共通領域である $3,200 \times 3,200$ ピクセルの領域に配置する。また、POC 関

数のピークによる誤対応除去の閾値を 0.15 に設定する。バンドル調整により最適化を行うパラメータは、航路 i ($i = 1, 2$) におけるレーダ入射角 θ_i 、スラントレンジ方向の分解能の逆数 α_{vi} 、外部パラメータ \mathbf{R} の回転角度 ϕ 、外部パラメータ \mathbf{t} の x および y 成分 t_x および t_y の 7 つである。

5.3 実験結果

地上投影変換後のグランドレンジ画像と標高マップを図 8 に示す。図 8 (a) および (b) は、それぞれ航路 1 および航路 2 の地上投影変換後のグランドレンジ画像である。図 8 (c) は、画像マッチングの際に基準点を配置した領域をグランドレンジ画像から抽出したものである。図 8 (d) は、バンドル調整前のパラメータを用いて計算した標高マップである。図 8 (e) は、バンドル調整で最適化されたパラメータを用いて計算した標高マップである。図 8 (f) は、真値である DEM から生成した標高マップである。また、提案手法によって計算された 3 次元点群と DEM との残差と 3 次元復元点数を表 2 に示す。バンドル調整前後のパラメータ値と再投影誤差を表 3 に示す。以上の結果から、提案手法を用いることで 10 m 以下の誤差で 3 次元計測が可能であることが確認できる。また、図 8 (d), (e), (f) から、バンドル調整を用いてパラメータの最適化を行うことで、高精度な 3 次元点群を取得できることがわかる。この結果は、SAR 画像の 3 次元計測においても、コンピュータビジョンで用いられているバンドル調整が有効であることを示している。

本実験で真値として用いた DEM は、人工物や樹木などの影響を除去した地表面の標高モデルである。これに対して、実験で使用した SAR 画像は、樹木などを含めたデータであり、この SAR 画像から求めた 3 次元点は、樹木の高さに相当する数メートル分の誤差が含まれている。本実験では真値に DEM を用いているが、建物や樹木などの高さを含んだ地表モデルである数値表層モデル (Digital Surface Model: DSM) を用いることができれば、提案手法の計測誤差は小さくなると考えられる。

また、計測誤差が生じる原因に、レーダ画像特有のジオメトリック画像変調やスペckルノイズによる画像マッチングへの影響が考えられる。そのため、これらを考慮した SAR 画像のための画像マッチングアルゴリズムを検討する必要がある。たとえば、Dellinger らは、スペckルノイズを考慮した SAR 画像のための SIFT アルゴリズムを提案している [9]。

ジオメトリック画像変調の中でも、陰影効果が生じている箇所は、受信信号が 0 であるデータが存在しない領域であるため、マッチングを正しく行うことができない。表 2 に示したように最大残差が 77 m となってしまったが、明らかに誤対応点を用いて 3 次元計測をしてしまった結果で

表 2 3 次元計測誤差と復元点数

RMS 誤差 [m]	9.37
平均残差 [m]	8.07
最大残差 [m]	77.58
3 次元復元点数	5,121,552

表 3 バンドル調整前後のパラメータ値と再投影誤差

	バンドル調整前	バンドル調整後
レーダ入射角 θ_1 [deg.]	47.25	47.77
レーダ入射角 θ_2 [deg.]	43.87	44.49
1/分解能 α_{v1} [pixel/m]	2.67	2.68
1/分解能 α_{v2} [pixel/m]	2.67	2.68
回転角 ϕ [deg.]	45.28	45.03
外部パラメータ t_x [pixel]	-1,005.99	-959.57
外部パラメータ t_y [pixel]	2,459.46	2,433.92
再投影誤差 [pixel]	4.36	1.01

あり、全体の計測精度を悪化させる原因となっている。このような影響を除去するためには、画像中の陰影領域を抽出し、陰影領域に基準点を配置しないで画像マッチングを行う必要がある。また、3 枚以上の SAR 画像から陰影領域が生じないように適切に画像選択を行うことで、陰影効果による影響を受けずに 3 次元計測を行うことを検討している。

6. まとめ

本稿では、SAR の 3 次元幾何をコンピュータビジョンの分野の解法に基づいて定式化することで、異なる航路で取得された 2 つの SAR 画像から地表面の 3 次元計測を行う手法を提案した。精度評価実験を通して、10 m 以下の誤差で 3 次元計測が可能であることを確認した。今後は、多航路で取得した複数枚の SAR 画像から 3 次元計測を行うことで、提案手法の高精度化を行うことを検討する。

参考文献

- [1] 大内和夫：リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎，東京電機大学出版局 (2004)。
- [2] Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E. and Goldstein, R. M.: Synthetic Aperture Radar Interferometry, *Proc. IEEE*, Vol. 88, pp. 333-382 (2000).
- [3] Szeliski, R.: *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer-Verlag New York Inc. (2010).
- [4] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in computer vision*, Cambridge University Press (2000).
- [5] Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D. and Szeliski, R.: A comparison and evaluation of multi-views stereo reconstruction algorithms, *Proc. Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 519-528 (2006).
- [6] Strecha, C., von Hansen, W., Gool, L. V., Fua, P. and Thoennessen, U.: On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery, *Proc. Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8 (2008).



図 7 実験に用いた SAR 画像：(a) 航路 1 で取得されたスラントレンジ画像，(b) 航路 2 で取得されたスラントレンジ画像

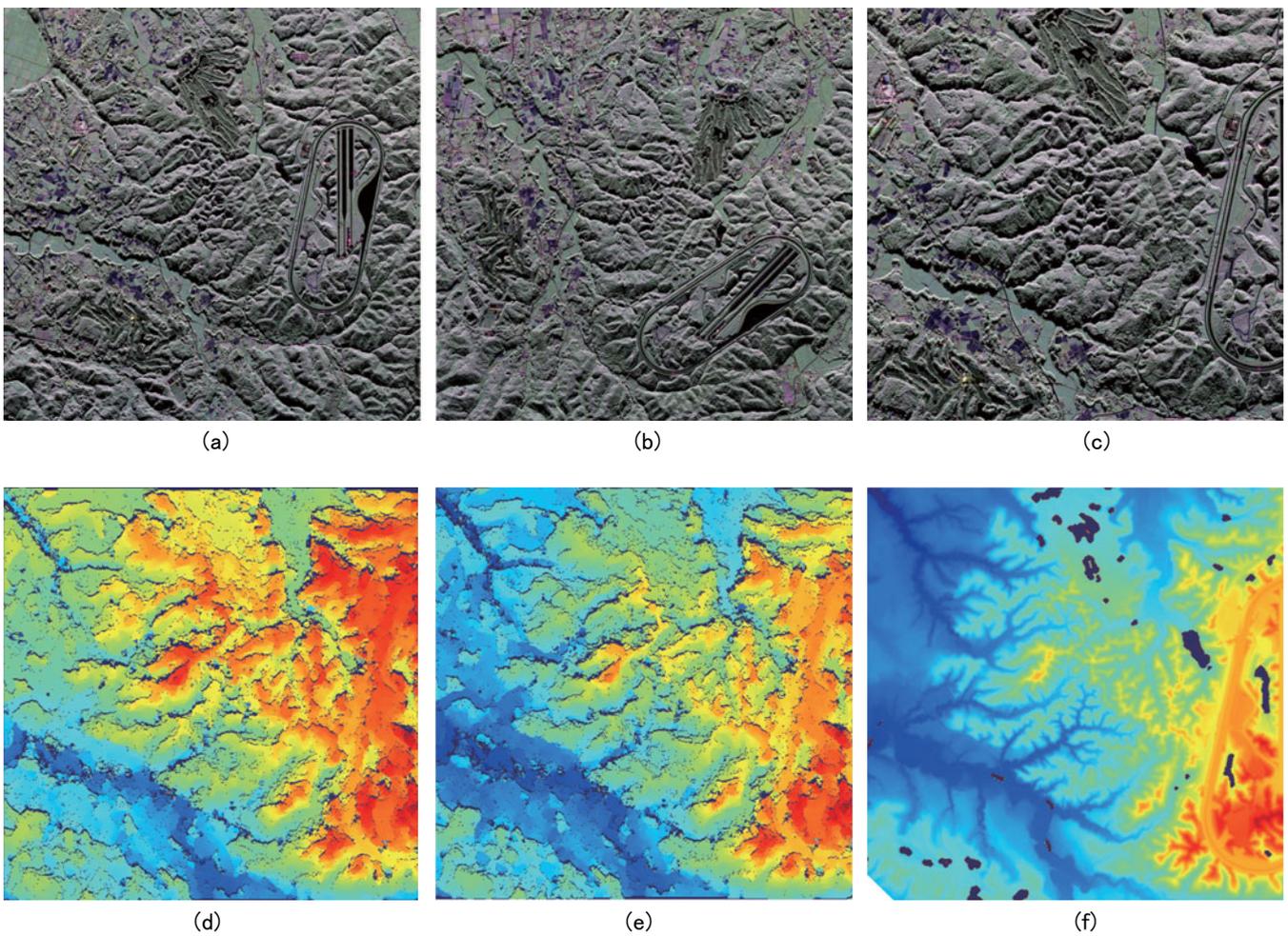


図 8 地上投影変換画像と標高マップ：(a) 航路 1 のグラウンドレンジ画像，(b) 航路 2 のグラウンドレンジ画像，(c) 3次元計測の対象領域，(d) 3次元計測結果（バンドル調整前），(e) 3次元計測結果（バンドル調整後），(f) 数値標高モデル (DEM) (青 (17 m)～赤 (211m))

- [7] Takita, K., Aoki, T., Sasaki, Y., Higuchi, T. and Kobayashi, K.: High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E86-A, No. 8, pp. 1925–1934 (2003).
- [8] Takita, K., Muquit, M. A., Aoki, T. and Higuchi, T.: A Sub-Pixel Correspondence Search Technique for Com-

- puter Vision Applications, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913–1923 (2004).
- [9] Dellinger, F., Delon, J., Gousseau, Y., Michel, J. and Tupin, F.: SAR-SIFT: A SIFT-like algorithm for applications on SAR images, *Proc. Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp.*, pp. 3478–3481 (2012).