

## SEASAT SAR 画像の地形歪み補正

Correction of Terrain Displacement for SEASAT SAR Imagery

前田 紘\*・村井 俊治\*

Hirosi MAEDA and Shunji MURAI

合成開口方式レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) によって得られる画像 (本論文では SAR 画像とよぶことにする) は, 全天候型で高分解である利点を有している。しかしながら, デジタル方式による画像再生に多大な計算時間がかかること, および地形の起伏による幾何学的歪み (本論文では地形歪みとよぶことにする) が大きいことの短所を有している。本論文は, デジタル方式によって画像再生がなされた後の処理済 SEASAT SAR 画像に対して, 地形歪みの補正を行う手法を示したものである。研究の成果によれば, 地形歪みを考慮した場合, 2 次の多項式で  $\pm 10$  m 以下の中等残差の座標変換が可能であり, 山岳部において 200 m ないし 300 m におよぶ地形歪みの補正が可能であることがわかった。

## 1. はじめに

レーダ画像は能動型センサによるリモートセンシングデータとして, その有用性が論じられている。レーダ画像は, その像形成方式上, 地形起伏によって特有の歪みを生じる。SEASAT SAR 画像の場合, 分解能は 25 m であるが起伏のある陸域において数 100 m におよぶ歪みを生じ幾何精度が良くない。幅広い高度な利用をするためには, この地形歪みの補正が必要である。

本研究は, SAR 画像と地図の対応を計り地形図から得られる標高データを用いて, 画像の地形歪みを補正する手法について論じる。わが国においては, 2.5 万分の 1 の地形図が整備されており, さらに国土数値情報が整備されていることから標高データを利用した SAR 画像の地形歪み補正が可能である。

## 2. SAR 画像の地形歪み

SAR 画像は, アンテナの方位方向 (進行方向)  $v$  とこれに直交するレンジ方向 (マイクロ波の照射方向)  $u$  を座標軸とする画像座標に投影される。図 1 に示すように, 基準平面  $E$  から  $Z$  の高さにある地形点  $P$  の像はあたかも基準平面上の点  $P'$  の像であるかのように, 画像座標  $(u', v')$  に位置づけられることになる。一般に, 像再生において, 地形の高さ  $Z$  は未知であるから, 全ての画素は基準平面上にあるものと仮定して画像が作られる。

像形成はレンジ方向の 1 ラインの画像が収集され直交する方位方向に順次収集されると考えられる。すなわち, SAR 画像の地形歪みはレンジ方向にのみ生じるとする。図 1 において, SAR 画像座標を  $(u', v')$ , 基準面に対する地形点の座標を  $(u, v)$  とすれば,  $(u', v')$  と  $(u, v)$  の間にはつぎの関係が成り立つ。

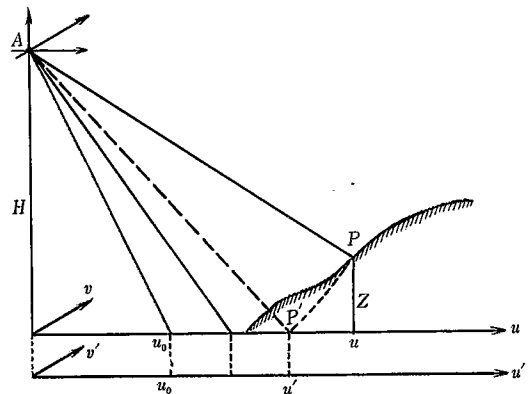


図 1 SAR 画像の地形による歪み

$$\left. \begin{aligned} H^2 + (u' + u_0)^2 &= (H - Z)^2 + (u + u_0)^2 \\ v' &= v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで,  $H$  はアンテナ A の基準面からの高さ,  $u_0$  はアンテナ鉛直点から画像始点までの距離,  $u, u'$  は画像始点  $u_0$  から対象点  $P, P'$  までの距離を示す。

(1) 式は  $(u, v)$  座標で地形点の高さ  $Z$  が与えられれば, その SAR 画像座標  $(u', v')$  が与えられることを示す。ここで地形歪みとは  $(u - u')$  であり, 地形標高, 鉛直点からの距離, 衛星の高度の関数で与えられる。図 2 はアンテナ高度を SEASAT 高度 ( $H = 794$  km) としたとき, 鉛直点からの距離 ( $u$  座標) が 100 km から 10 km おきに 440 km まで, 地形標高が  $Z = 0 \sim 4000$  m まで変化したときの地形歪みを示したものである。

SEASAT の SAR 画像は高度約 800 km から, アンテナ傾角約  $20^\circ$  を中心として幅  $6.2^\circ$  を照射して得られたものである。そのため画像の幅は, 鉛直点より約 250 km 離れた地点より約 100 km となる。地形を鉛直線に直交する平面と仮定すると, 図 3 に示すように地球曲率による偏位が無視できなくなるほど大きくなる。図 3 はレンジ

\* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

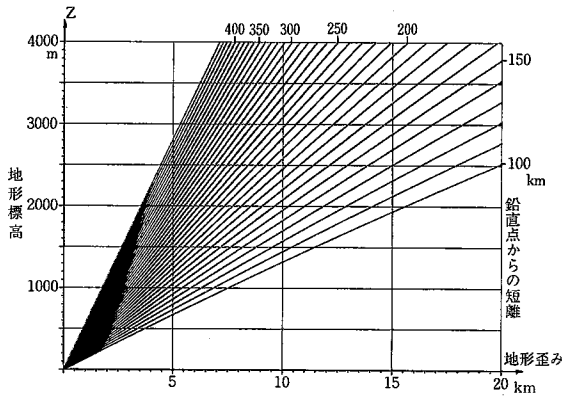


図2 ターゲットの高さ  $Z$  と SAR 画像の歪み ( $H=794$  km)

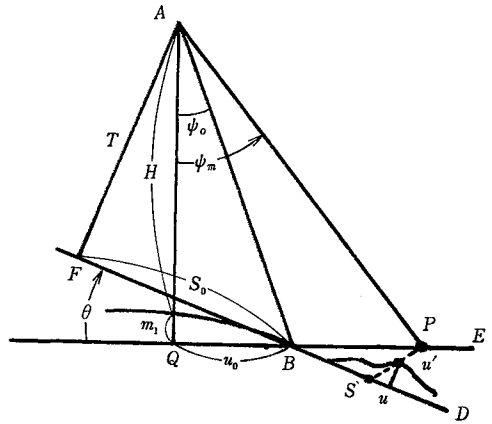


図3 球面による基準面の傾きを考慮した地形歪み

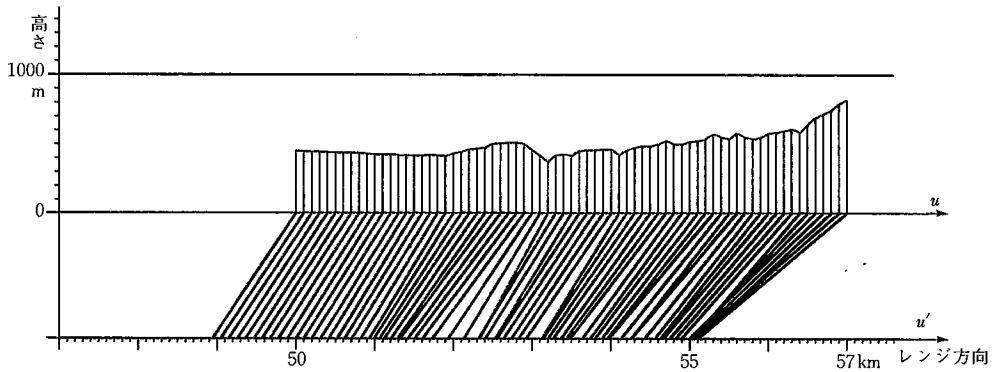


図4 レンジ方向の地形歪み ( $T=786.65$  km,  $S_0=286.59$  km)

方向の地球断面を示し、 $\overline{QE}$  を SAR 画像面、 $\overline{FD}$  を球面を考慮した基準平面とする。 $\psi_m$  はアンテナ傾角、 $\psi_0$  はビーム始端角とする。地形起伏は  $\overline{BD}$  面上に形成されており、画像は  $\overline{BE}$  面上に再成されていると考える。アンテナ A の  $\overline{BD}$  面までの距離を  $T$ 、 $\overline{FB}=S_0$ 、 $\overline{QB}=u_0$  として B 点を原点としたときの  $\overline{BE}$  上の位置  $u'$  にある画素 P の  $\overline{BC}$  上の位置 S との間にはつぎの関係が成り立つ。

$$T^2 + (S + S_0)^2 = (H + m_1)^2 + (u' + u_0)^2 \quad (2)$$

$\overline{BD}$  上での地形起伏を考慮すれば、(1) (2) 式よりつぎの式が求まる。

$$(T - Z)^2 + (u + S_0)^2 = (H + m_1)^2 + (u' + u_0)^2 \quad (3)$$

$m_1, u_0, T, S_0$  はつぎの式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \{(R - H \cdot \tan^2 \psi_0) \\ &\quad - \sqrt{R^2 - H(H + 2R) \cdot \tan^2 \psi_0}\} / (1 + \tan^2 \psi_0) \\ u_0 &= (H + m_1) \tan \psi_0 \\ T &= (H - P_2 \tan \theta + m_2) / (1 + \tan^2 \theta) \\ S_0 &= \sqrt{u_0^2 + (H + m_1)^2} - T^2 \\ m_2 &= \{(R - H \cdot \tan^2 \psi_m) \\ &\quad - \sqrt{R^2 - H(H + 2R) \cdot \tan^2 \psi_m}\} / (1 + \tan^2 \psi_m) \\ P_2 &= (H + m_2) \tan \psi_m \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、 $R$ : 地球半径

図4 は SEASAT について  $H=794$  km,  $\psi_m=20.5^\circ$ , ビームスワース角  $=6.2^\circ$ ,  $R=6377.39$  km として SAR 画像に及ぼす地形起伏の影響を示したものである。 $u$  軸が基準面上の等間隔に標高を示した地形を表し、 $u'$  軸がその画像位置を示す。図4 から明らかのように、高さ  $Z$  の増加によって像の位置は衛星側に引きよせられ、図の右端の急傾斜面では像の水平距離関係の逆転 (layover とよばれる) が生じている。 $u'$  軸上で線の密な所は像の縮みを生じ、粗な所では伸びが生じ、さらに重なり合っている所では画素の重なりを生じる。

### 3. 地形歪みの補正

SAR 画像の地形歪みを補正するには、前項で示したように各画素に対する高さ  $Z$  を与えなければならない。まず画像座標系、基準面座標系および地図座標系の関係を確立しなければならない。図5 は上記3つの異なる座標系の間で変換可能な方向と式の番号を示したものである。

#### (1) 地上基準点 (G.C.P.) の選定

基準点 (G.C.P.) を未補正 SAR 画像上および地図上で選定し、画像座標  $(u, v')$  と地図座標  $(X, Y, Z)$  を得る。 $(u, v')$  は画素座標  $(I, J)$  に画素寸法を乗じて求める。

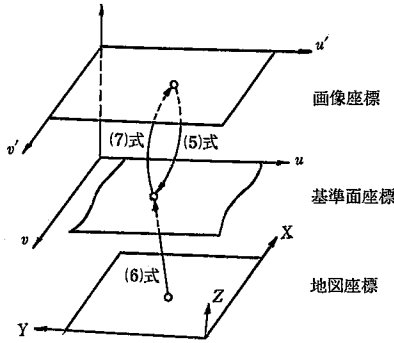


図 5 3つの座標系の関係

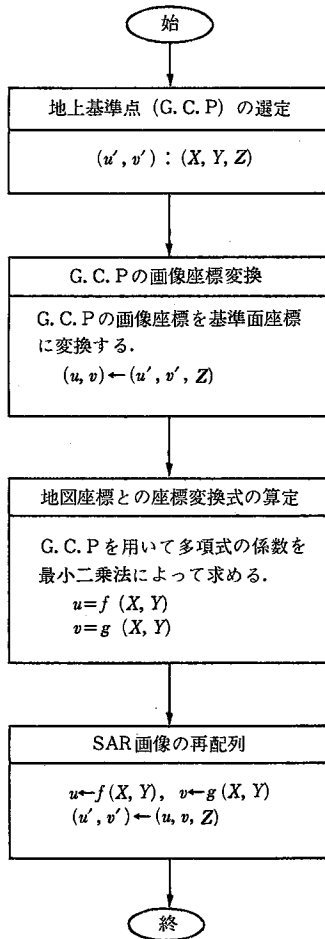


図 6 地形歪み補正を考慮した SAR 画像の再配列

次に地形歪みの補正の手順を段階的に示す。(図 6 参照)  
(2) 地上基準点(G.C.P.)による座標変換式の算定。

式(3)をつぎのように表し、 $(u', v')$ 座標を $(u, v)$ 座標に変換する。

$$\left. \begin{aligned} u &= \sqrt{(H+m_1)^2 + (u' + u_0)^2 - (T-Z)^2} - S_0 \\ v &= v' \end{aligned} \right\} (5)$$

表 1 画像-地図座標変換式による G.C.P. の中等誤差

| 多項式  | レンジ方向 ( $u$ ) |        | 方位方向 ( $v$ ) |        |
|------|---------------|--------|--------------|--------|
|      | 地形歪み無視        | 地形歪み考慮 | 地形歪み無視       | 地形歪み考慮 |
| 一次式  | 221.6m        | 198.3m | 90.1m        | 82.8m  |
| 共一次式 | 215.4         | 192.7  | 89.8         | 82.0   |
| 二次式  | 93.0          | 8.5    | 37.2         | 6.0    |
| 三次式  | 57.3          | 6.8    | 28.5         | 5.4    |
| 四次式  | 40.5          | 6.9    | 24.2         | 4.5    |
| 五次式  | 28.9          | 6.5    | 24.7         | 3.7    |

(G.C.P.は35点)

G.C.P.の各点の画像座標を式(5)によって基準面座標に変換し、最小二乗法を用いて多項式の係数を算定する。

$$\left. \begin{aligned} u &= f(X, Y) \\ v &= g(X, Y) \end{aligned} \right\} (6)$$

(3) SAR 画像の再配列

地図座標  $(X, Y, Z)$  に対応する SAR 画像を得るには、式(6)により  $(X, Y)$  に対する  $(u, v)$  を求め、その位置の高さ  $Z$  を与えて式(7)より  $(u', v')$  を求める。 $(u', v')$  に最近隣する画素を  $(x, y)$  の画素として内挿する。順次  $(X, Y, Z)$  を与えて画像の再配列を行う。

$$\left. \begin{aligned} u' &= \sqrt{(T-Z)^2 + (u+S_0)^2 - (H+m_1)^2} - u_0 \\ v' &= v \end{aligned} \right\} (7)$$

式(7)は、前に示した式(3)を変形すると得られる。

以上の手順により補正再配列が行える。補正対応点の地図座標すべてに対して  $(X, Y, Z)$  が必要である。

4. テ ス ト ケ ー ス

テスト ケースとして、つぎの SAR 画像および地図を用いた。

a. SAR 画像 (図 7)

LOS ANGELES 周辺: 1979 年 5 月 22 日 SAR 再生画像 CCT, 6140 画素×5840 ライン, 画素寸法: 25 m×25 m

b. 地 図

LOS ANGELES 周辺: 25 万分の 1 地勢図および 2.4 万分の 1 地形図

c. DTM (図 9 b の地域)

2.4 万分の 1 地形図 PASADENA

UTM 11 Zone, EW 380 km~391 km, NS 3780 km~3790 km

100 m×100 m メッシュの標高を 10 feet 単位で読み取り、25 m×25 m メッシュに内挿

G.C.P.は LOS ANGELES を中心に、SAR 画像約 2/3 シーンに対して 35 点を選択した。<sup>2)</sup> 地形歪み補正に対する条件は SEASAT 高度  $H=794$  km, アンテナ傾角  $\phi_m=20.5^\circ$ , ビームスワース角  $=6.2^\circ$ , 地球半径  $R=6377$ .



図 7 LOS ANGELES 周辺の SEASAT SAR 画像 (1979.5.22)

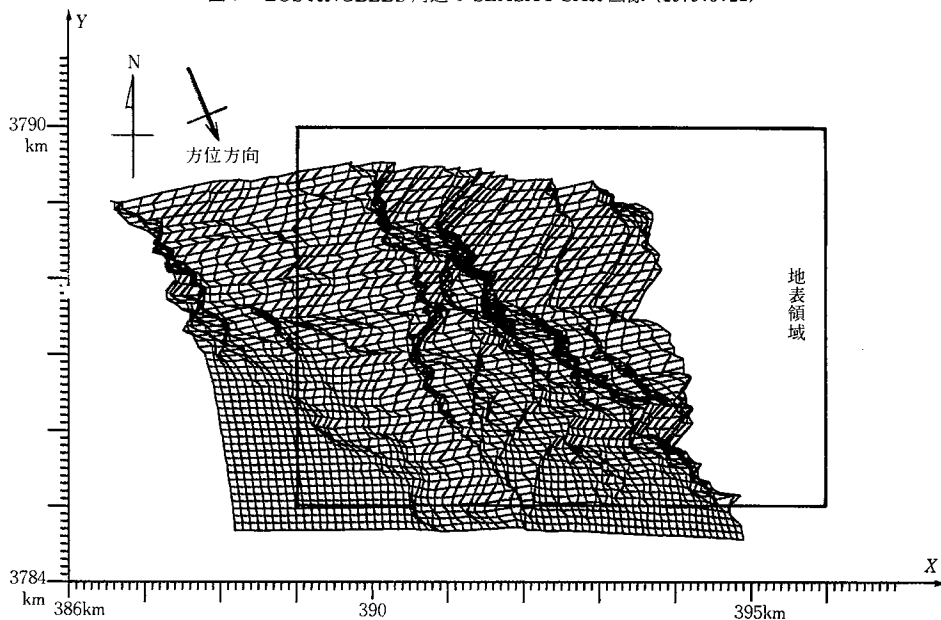
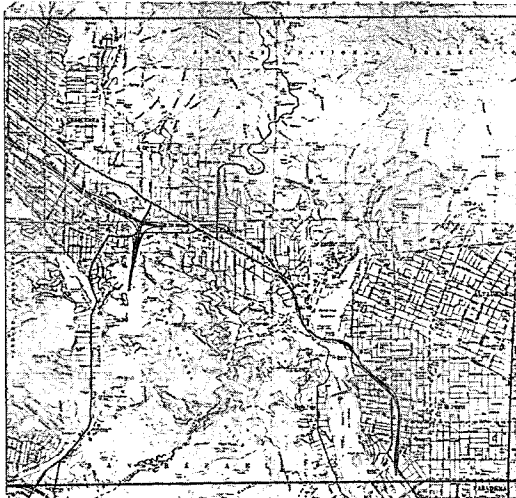


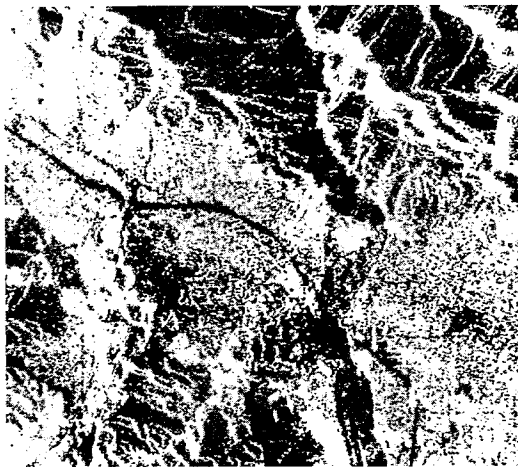
図 8 地形歪みを含んだ SAR 画像領域 (地図座標上に表示)

39 km として,  $\psi_0 = 17.4^\circ$ ,  $u_0 = 250.37$  km,  $S_0 = 286.60$  km,  $T = 786.65$  km を用いた.

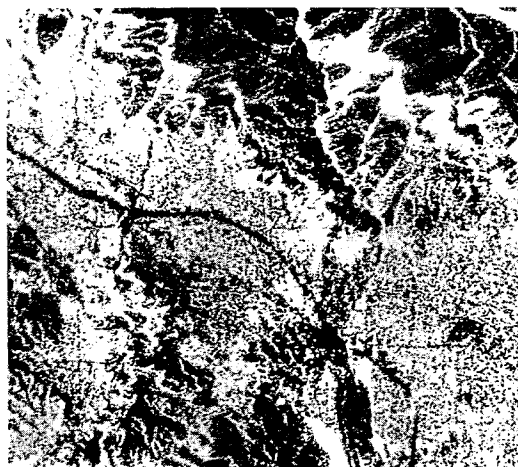
地図座標と画像座標間の座標変換式として 1 次式から 5 次多項式までのあてはめを行った. 表 1 は求められた



(a) SAR 画像に対応する地形図



(b) 地形歪み補正を考慮しない再配列



(c) 地形歪み補正を考慮した再配列

図9 地理補正された SAR 画像 (PASADENA, CALIFORNIA, U.S.A.)

多項式による G.C.P. の中等誤差を示したものである。中等誤差の比較から、地形歪み補正の効果がわかる。2 次多項式以上では地形歪み補正によって、10 m 以下の精度が得られた。

図8は座標変換式として2次多項式を用い、地図座標上に示されている地図領域の SAR 画像を示した。図の上部は山地で左下の平地部分と800~1000 m の標高差がある。線が重なり合っている所は急傾斜面であり、画像の layover を起こしている部分である。図8は図9の右上4半分に対応する。

図9(b), (c)は地形歪みを考慮しない方法と地形歪み補正を考慮した方法によって再配列した SAR 画像である。図9(a)は対象領域の地図を示す。地形歪みを考慮しない方法の座標変換式は3次多項式を用い、地形歪みを考慮した方法では2次式を用いた。南北10 km、東西11 kmを25 m×25 mの画像で再配列した。再配列に要した CPU 時間は、FACOM M 160-ADで前者が12分24秒、後者が12分43秒であった。

補正画像から数個の参照点に対しての位置精度は平地部分で両者とも100 m 前後であったが、山地部においては地形歪みを考慮しない方法の場合は200 m~300 m の誤差を生じた。地形歪み補正を行った場合は平地部分と相異がなかった。

## 5. 結 論

SAR 画像の地形歪み補正について、つぎのように要約される。

1. SAR 画像に対する地形起伏による歪み補正は、レンジ方向について考慮するのみによっても、十分その効果が得られる。
2. 地形歪み補正を行うことによって SAR 画像の位置精度は、画面全体にわたって均質となる。SEASAT SAR 画像の場合、100 m 以下の中等誤差の精度が期待できる。
3. 標高精度が位置精度に直接影響する。
4. 再配列に要する CPU 時間は地形歪み補正を行う方法と行わない方法とほとんど変わらない。再配列に要する CPU 時間は、FACOM M 160-AD を用いた場合、1000 画素あたり約 4.3 秒を要した。

(1982年6月15日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 松尾, 山根: レーダホログラフィ, 電子通信学会, 1980
- 2) Shunji Murai, Hiroshi Maeda: Image Resistration of LANDSAT MSS Data and SEASAT SARData. The Second ASIAN Conference on Remote Sensing, 1981
- 3) 前田, 村井: DTM による SAR 画像の地形歪みの補正, 昭和 57 年度日本写真測量学会学術講演会発表論文集, 1982