

山岳地の合成開口レーダ画像のための
幾何補正を用いた初歩的位置合わせに関する考察

島根大学 総合理工学部 数理・情報システム学科

計算機科学講座 田中研究室

S073101 橋本 沙優

目次

第1章 序論

第2章 合成開口レーダ(SAR)

- 2.1 SAR 観測原理
- 2.2 JERS-1
- 2.3 JERS-1 データ

第3章 幾何補正処理

- 3.1 地上基準点の取得
- 3.2 線形回帰モデルによる座標変換式の決定
- 3.3 共一次内挿法

第4章 幾何補正処理の実装

- 4.1 プログラムの作成及び実行環境について
- 4.2 プログラム内で使用した画像データ

第5章 位置合わせ手法

第6章 位置合わせ手法の実装

- 6.1 プログラムの作成、実行環境について
- 6.2 作成したプログラムおよびプログラム内で使用した画像データ

第7章 実験結果

- 7.1 実験方法
- 7.2 実験結果
- 7.3 結果比較

第8章 終論

- 8.1 結論
- 8.2 今後の課題

参考資料・参考文献

謝辞

第1章 序論

近年、地球温暖化や地球規模の自然災害などにより、山岳地において生態系の破壊や植生分布の変化が生じている[1]。これらの山岳環境変化の察知には、空間的、時系列的に把握できる衛星リモートセンシング技術が用いられている。

衛星リモートセンシングのために使用されている技術のなかでも合成開口レーダ（SAR）は能動型のマイクロ波センサであり、雲や昼夜の制約を受けない。これは雲がかかりやすい山岳地の状況把握に最適である。

人工衛星データは、地球の曲率、衛星の観測角、地形の高低差等により幾何的な誤差が生じるため、そのままでは他の衛星データに重ね合わせることができない。このため衛星データに対し、幾何的な歪みを除去する幾何補正処理を行わなければならない。

山岳地において衛星画像を用いて植生調査などを行う場合、異なる時期の衛星画像を比較し、変化抽出を行う。その際、それぞれの画像を精密に重ね合わせる必要がある。

そこで本論文では、山岳地の SAR 画像を幾何補正処理を用いて、精密に重ねるための初歩的な方法についての考察を行った。

第2章 合成開口レーダ (SAR)

2.1 SAR観測原理

合成開口レーダ (SAR) は、Synthetic Aperture Radar の略で、JERS-1 に搭載された能動型マイクロ波センサである。

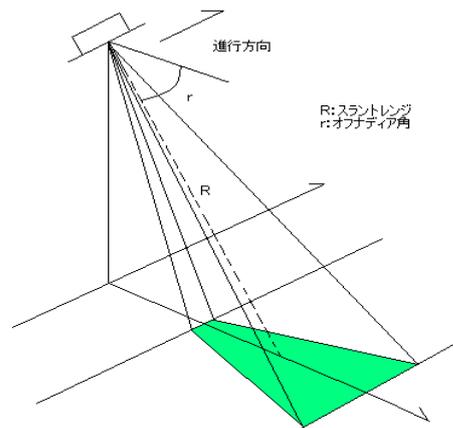


図 2-1

SARは衛星進行方向に直行した斜め下方向にパルス電波を次々と投射し、地表面からの散乱・反射波を受信する。散乱・反射が大きいところは明るく、小さいところは暗く現れる。また滑らかな面は暗く、荒い面は明るい等、地表面の状態によって異なり、この明暗が画像となって現される。また、マイクロ波であるため、植生、乾いた砂地等を透過しその下の情報（地表面等）を得ることができる。

受信された散乱・反射波は衛星上でデジタル化等の処理をされた後、ミッション送信機 (MDT) によって地上に送られ、データ処理が行われる[2]。

2.2 JERS-1

地球資源衛星「ふよう1号」1号JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1) とは、地球資源情報の収集を主目的とし、国土調査等の能動的な観測を行うことを目的に1992年2月に種子島宇宙センターからH-1ロケットで打ち上げられた。

JERS-1の主な仕様は表2-1のとおりである[3]。

形状	構体: 約 1m x 1.8m x 3.1m 合成開口レーダ: 約 12m x 2.5m 太陽電池パドル: 約 8m x 3.4m	
重量	約 1.4t	
姿勢制御方式	三軸姿勢制御方式 ゼロモーメントム	
設計寿命	2年	
打上げロケット	H-I	
打上げ場所	種子島宇宙センター	
打上げ日時	1992年(平成4年)2月11日	
軌道	種類	太陽同期準回帰軌道
	高度	568km
	傾斜角	98度
	周期	96分
	回帰日数	44日

表 2-1 JERS-1 仕様

2.3 JERS-1 データ

JERS-1 データは表 2-2 のように 10 の段階に処理され、そのそれぞれによってデータの表現方法が異なっている [3]。

処理レベル	ピクセルス ペーシング	データフォーマット形式	格納形式 (レンジ× アジマス)	1 ピクセル
0		Complex integer × 1	6144 × 19904	2Byte
1.0		Complex real × 4	5968 × 19904	8Byte
1.1/1 ルック		Complex real × 4	5936 × 16896	8Byte
1.1/3 ルック		real × 4	5936 × 8448	4Byte
2.0/2.1	12.5m	integer × 2	6400 × 6000	2Byte
	18.0m	integer × 2	4450 × 4200	2Byte
	25.0m	integer × 2	3200 × 3000	2Byte
3.0/4.0	12.5m	integer × 2	6000 × 6000	2Byte
	18.0m	integer × 2	4200 × 4200	2Byte
	25.0m	integer × 2	3000 × 3000	2Byte

表 2-2 JERS-1 データ仕様

本研究で使用したデータはレベル 2.1、ピクセルスペーシング 12.5m の

- ・画像 A : 1994 年 12 月 17 日に取得された富士山周辺の画像を 600×600 に切り取った画像(図 2-2 に示す)
- ・画像 B : 1993 年 11 月 16 日に取得された富士山周辺の画像を 600×600 に切り取った画像(図 2-3 に示す)

の 2 つの画像である。

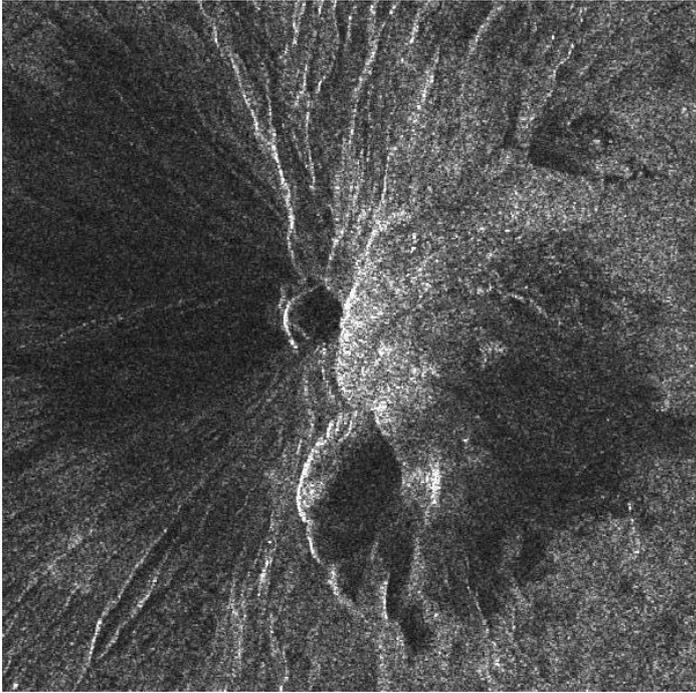


图 2-2 画像 A

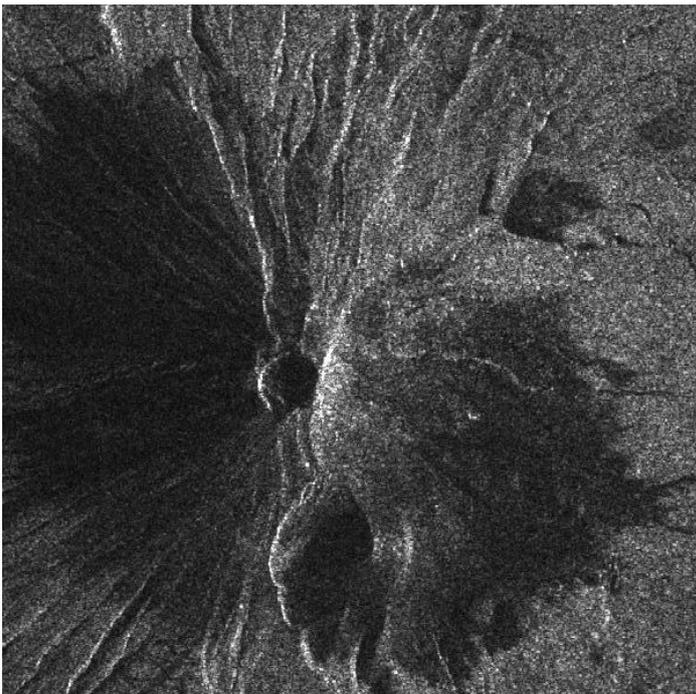


图 2-3 画像 B

第3章 幾何補正処理

3.1 地上基準点取得

地上基準点 (Ground Control Point : 以下、総称してGCPとする) とは、特定の画像に対応する参照地図の座標点のことである。

GCPを取得するには、まず、衛星データを画像表示する必要がある。そして画像化した衛星データから地上基準点を取得する。

次に衛星データ画像と地図とを比べて、見た目が同じ地点の座標を記録する。この GCPは、座標変換式である関数決定の際必要になる。

座標変換式となる関数の決定は、採用した変換式の数値モデルとGCPに依存する。しかし、最終的な関数決定は、GCPに全面的に依存するため、GCPの精度が式決定に直接影響を与える。よって、GCP選定の際には、様々な注意が必要である。

- 標高の低い所
 - 高い所は衛星画像で位置ずれが生じる (山など)
- 時間による地形の変化が少ない場所
 - 時間で変化する所は地形の境目が曖昧で、点を取りにくい (海岸など)
- 両座標系でその位置が明瞭に確認できる所

また、なるべく画像全体から一様に取りようにする。これは取り方が偏りすぎるとGCP を取得していない部分の歪みが大きくなることがあるからである。GCP 取得に適した具体例として、比較的大きな川にかかる橋、埋め立て地の隅、建物の隅、交差点、川や道路の曲がり角などが挙げられる。

本研究では、衛星データ画像 (600pixels × 600lines) 、衛星画像と同じ範囲の2万5千分の1国土地理院地勢図を見比べて、17点のGCP を取得した。(表3-1参照)

また GCP は、それぞれにおいて、左上を(0,0)とし GCP の取得を行った。

衛星画像 x	衛星画像 y	地勢図 x	地勢図 y
139	364	203	354
204	311	259	329
245	322	288	332
297	560	325	563
267	463	298	462
198	277	238	314
276	499	304	509
357	333	398	319
355	279	391	271
427	257	444	213
451	338	460	283
357	313	396	296
432	345	447	288
519	300	506	235
540	264	513	196
142	101	228	1
140	147	211	55

表 3-1 取得した地上基準点(GCP)

3.2 線形回帰モデルによる座標変換式の決定

座標変換式を推定するためには、線形回帰モデル、またはそれを拡張した多変量回帰モデルが用いられている[4]。また本研究では、線形回帰モデルを用いて座標変換式を決定した。

線形回帰モデルとは、まず前段階で衛星画像から取得した画像座標 (GCP) を (u, v) 、地図から取得した地図参照座標 (GCP) を (x, y) とする。

そうすると次の式のような関係が得られる。

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy + \alpha_5 x^2 + \alpha_6 y^2 \\ v = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 xy + \beta_5 x^2 + \beta_6 y^2 \end{cases}$$

これより、

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix}, \mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n y_n & x_n^2 & y_n^2 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix}, \mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} \text{とおき、}$$

次の線形モデル : $\mathbf{u} = \mathbf{X}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{e}$ ($\mathbf{u}: n \times 1, \mathbf{X}: n \times 6, \boldsymbol{\alpha}: 6 \times 1, \mathbf{e}: n \times 1$) を想定する。

線形回帰係数を $\boldsymbol{\gamma}$ とすると、 $\boldsymbol{\gamma} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{u}$ で求められる。

3.3 共一次内挿法

回帰モデルにより座標変換式が決定した結果、歪みのある衛星画像に対してようやく幾何補正を行うことが可能となる。しかし、補正後の座標点と補正前の座標点がうまい具合に一致する可能性は非常に低い。よって、少しずれて隣接する補正前の座標点の輝度の値から内挿を施してやらなければならない。一般に、内挿は以下の3通りの方法が用いられている[4]。

- ・ 最近隣内挿法 (nearest neighbor 法)
- ・ 共一次内挿法 (bi-linear 法)
- ・ 3次畳み込み内挿法 (cubic convolution 法)

本研究では、このうち共一次内挿法を用いて精密幾何補正後の画像を作成した。

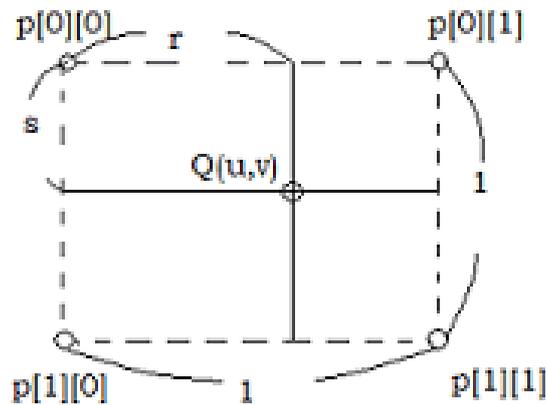


図3-1 共一次内挿法

共一次内挿法は原画像のある点 (u,v) の座標変換を行う場合、線形回帰モデルで求めた値を a,b とすると、

$$r = a - aa \quad aa : a \text{を整数化したもの,}$$

$$s = b - bb \quad bb : b \text{を整数化したもの,}$$

その周辺の4つの頂点を $p[0][0], p[0][1], p[1][0], p[1][1]$ とすると、

座標変換後の内挿値 $Q(u,v)$ は

$$Q(u,v) = (1-r)(1-s)p[0][0] + r(1-s)p[0][1] + s(1-r)p[1][0] + (rs)p[1][1]$$

で求められる。

第4章 幾何補正処理の実装

4.1 プログラムの作成及び実行環境について

- ・実行環境
 - ・ OS : Window 7 Home Premium
 - ・ CPU : Intel(R) Core(TM)2 Duo E7500@2.95GHz
 - ・ メモリ : 2.0GB
 - ・ システムの種類 : 32bit オペレーティングシステム

本研究で使用したソフトウェア、プログラミング言語は

- ・ ソフトウェア : MATLAB 7.1
- ・ プログラミング言語 : MATLAB

4.2 作成したプログラムおよびプログラム内で使用した画像データ

<プログラム>

kikahosei.m : 線形回帰モデルで回帰係数を求め、共一次内挿法を用いて衛星画像に対し幾何補正を行うプログラム

<画像データ>

cutdata2_1b : 画像A
cutdata2_1bnew : 幾何補正を行った画像A

<プログラムのアルゴリズム>

○kikahosei.m

回帰係数を求める

```
for(n=0; n<N; n++){  
    for(m=0; m<L; m++){  
        座標変換式の決定;  
        内挿値の決定;;  
    }  
}
```

最後に幾何補正後の画像出力を行う

以下に、精密幾何補正前の衛星画像、そして本研究の位置合わせに用いた精密幾何補正後の衛星画像を図示する。

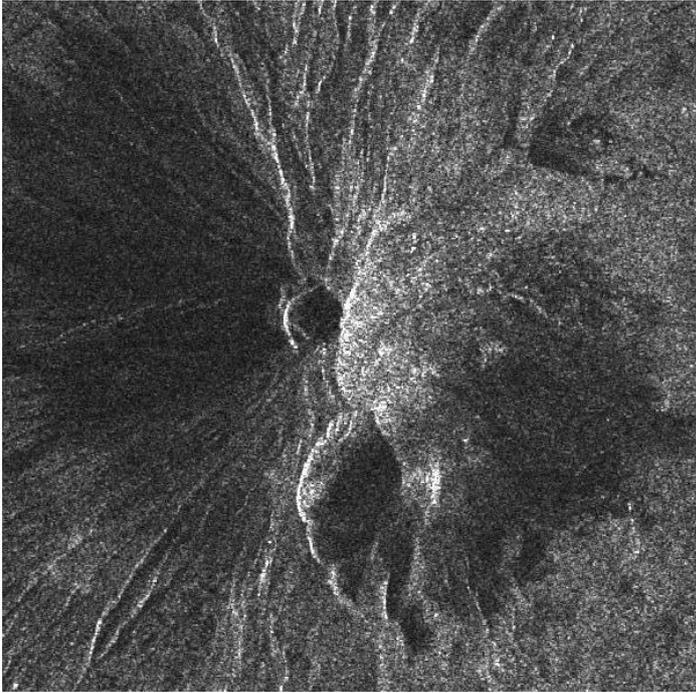


図 4-1 画像A

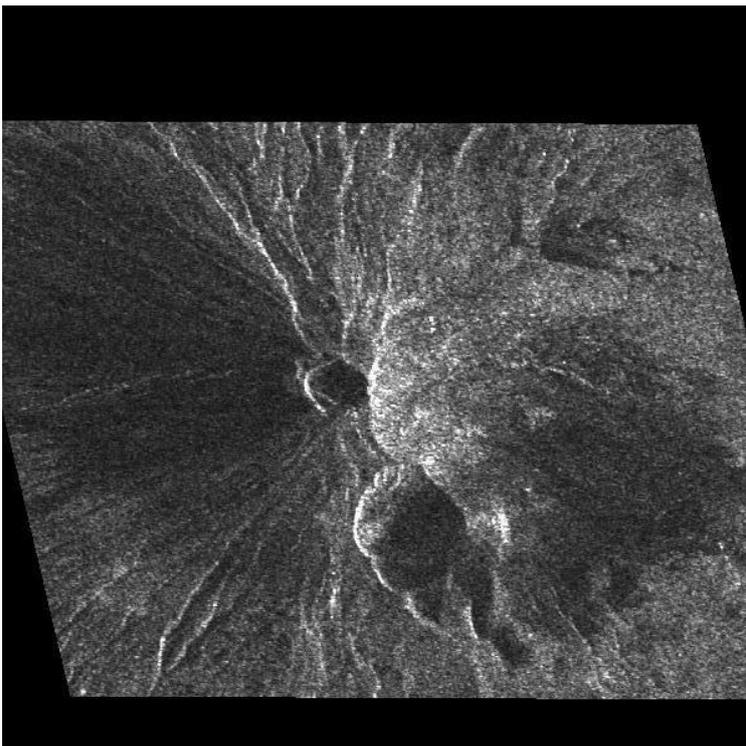


図 4-2 幾何補正を行った画像 A

第5章 位置合わせ手法

画像の位置合わせを行う上で、最も一般的な方法の1つが相関法である。(Franz W. Leberl , 1990)

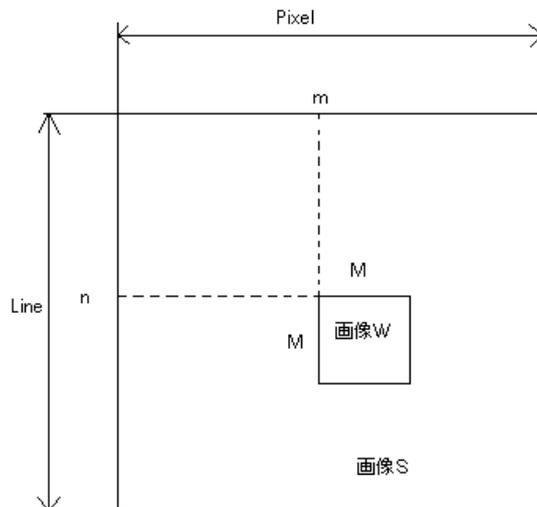


図 5-1

図 5-1 のように、片方の画像から $M \times M$ の画像ウインドウ W を取り出し、もう一方の画像領域内で 1 画素ずつずらしながら W と画像 S との間の相関値を求める。相関値は次の式で求められる。

$$R(m, n) = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M W(i, j) \cdot S(i + m, j + n)}{\left| \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M W^2(i, j) \right|^{1/2} \cdot \left| \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M S^2(i + m, j + n) \right|^{1/2}}$$

上の式を $1 \leq m \leq \text{Pixel} - M + 1$, $1 \leq n \leq \text{Line} - M + 1$ の範囲で計算し、 $R(m, n)$ が最大値をとる (m, n) がマッチングポイントであるとみなす。

第6章 位置合わせ手法の実装

6.1 プログラムの作成及び実行環境について

- ・ 実行環境
 - ・ OS : Window 7 Home Premium
 - ・ CPU : Intel(R) Core(TM)2 Duo E7500@2.95GHz
 - ・ メモリ : 2.0GB
 - ・ システムの種類 : 32bit オペレーティングシステム

本研究で使用したプログラミング言語

- ・ プログラミング言語 : C 言語

6.2 作成したプログラムおよびプログラム内で使用した画像データ

<プログラム>

soukanhou2.c : 相関法によるマッチングポイント検索プログラム

<画像データ>

cutdata2_1bnew : 幾何補正処理を行った画像A

cutdata3_1b : 画像B

<プログラムのアルゴリズム>

○soukanhou2.c

最大相関値を求める

```
for(m=0; m<N-M+1; m++){
    for(n=0; n<L-M+1; n++){
        相関値の計算に使うデータの初期化;
        相関値の計算を行う;
        if(現在最大の相関値<求めた相関値){
            現在最大の相関値に求めた相関値を代入し、
            そのときの  $m,n$  を保存する;
        }
    }
}
```

最後に最大相関値となった m,n がマッチングポイントとなる

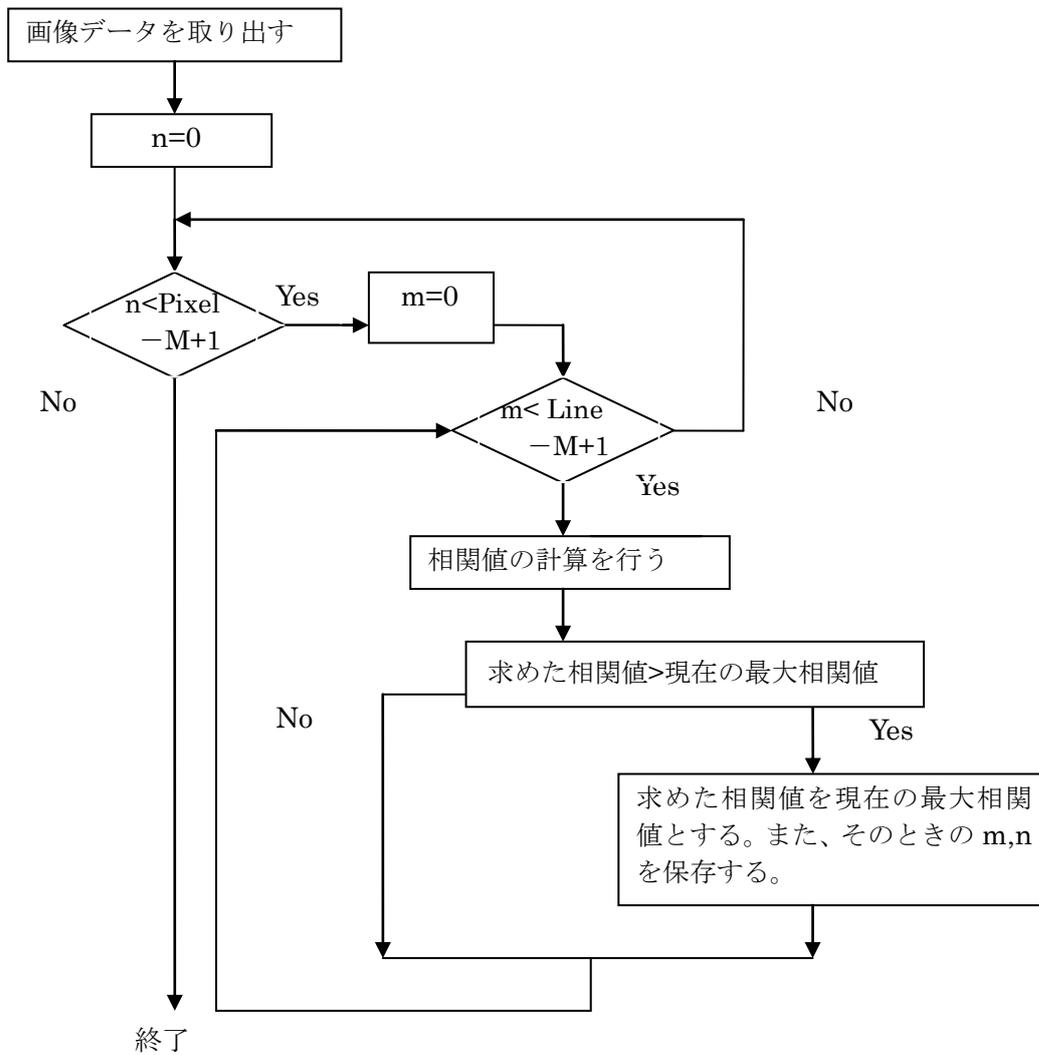


図 6-1 : soukanhou2.c のフローチャート

第7章 実験結果

7.1 実験方法

幾何補正処理を行った画像Aから(230,242),(241,308),(260,483),(292,309),(333,421),(398,418),(451,297),(504,187)の8点を左上端とする $M \times M$ のウィンドウを取り出し、それをもう片方の画像Bに重ねる。

相関法プログラム `soukanhou2.c` を実行し、相関値が最初に最大となった点を一致する点と見なす。今回実験では、ウィンドウサイズ M を 32 とした。

マッチング方法の精度の評価としては、テストによって得られた画像AのBに対応する点を画像上に示し、画像Aと見比べる。

7.2 実験結果

幾何補正を行った画像Aと画像Bの一致する点は下表のように得られた。

画像 A (m,n)	画像 B (m,n)
(230,242)	(191,47)
(241,308)	(509,433)
(260,483)	(385,561)
(292,309)	(121,231)
(333,421)	(219,10)
(398,418)	(552,114)
(451,297)	(148,326)
(504,187)	(377,557)

表 7-1 相関法の結果

7.3 結果比較

相関法の結果比較を行うために、以下に比較画像を示す。

同色の印が幾何補正を行った画像 A と画像 B の対応する点を示している。

図 7-1 と図 7-2 で比較を行う。

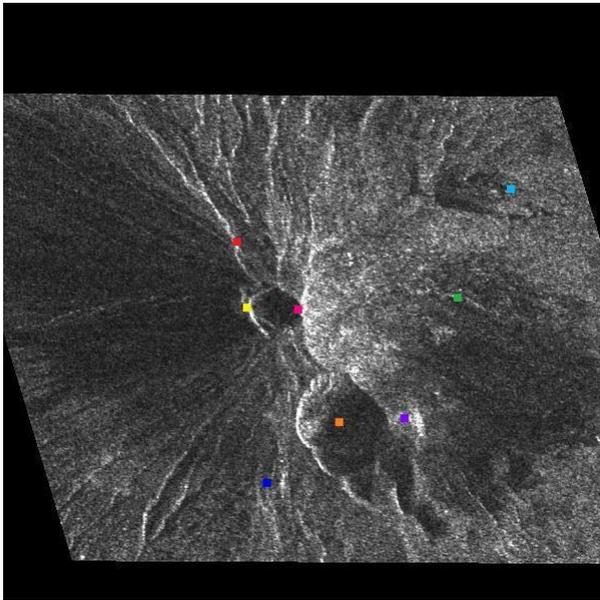


図 7-1 幾何補正した画像 A の相関法で基準とした点

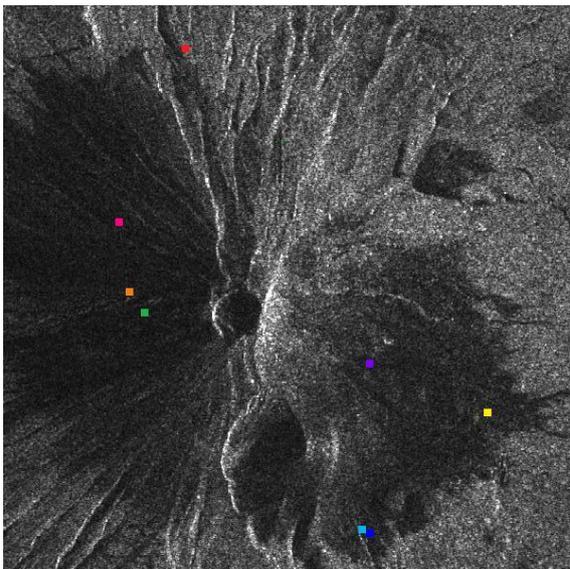


図 7-2 画像 B の相関法により得られた点

図を見比べた結果、両方の図において同色の印が一致せず、画像 A と画像 B のマッチングポイントが得られなかった。

第8章 終論

8.1 結論

実験結果より合成開口レーダ画像に相関法は適さないと思われる。

この理由として、相関法では2つの SAR 画像間のデータの差が大きかったために、本来一致している場所で相関値が最大とならなかったことが考えられる。これは、使用した2つの SAR 画像自体が異なる衛星軌道上から取得されたものであるため、レーダの照射角が異なってくる結果、反射波の強度が異なるために画像間の濃度値に差が現れてしまったためであると考えられる。この理由から、SAR 画像に対して相関法を用いるのは適していないと考えられる。

8.2 今後の課題

今後の課題として、画像間の濃度差に左右されない位置合わせ手法の提案が挙げられる。

具体的には、位相限定相関法や正規化相互相関法や画像の位相情報を用いて位置合わせを行う位相限定相関法 や画像の正規化処理（輝度変化を補正：各点の輝度値から平均値を引き標準偏差で割る）を行ってから相関値を計算対応点を求める正規化相互相関法が SAR 画像に適していると考えられる。

参考文献・参考資料

- [1] http://eco.nikkeibp.co.jp/style/eco/report/080902_shinrin/
- [2] 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
- [3] 宇宙開発事業団地球観測センター, 「地球観測データ利用ハンドブック-JERS-1 編一, (財) リモート・センシング技術センター, 1996
- [4] 清水邦夫, 「地球環境データ-衛星リモートセンシング-」, 共立出版, 2002

謝辞

本研究を行うにあたり，終始御指導を頂きました田中章司郎教授には深く御礼申し上げます。

また、本研究に関しまして、李昊さん、韋于思さん、小室翼さん、三島健太さん、田中陽子さんには数々の御協力と御助言を頂き、厚く御礼申し上げます。

なお、本論文、本研究で作成したプログラム及びデータ、並びに関連する発表資料等の全ての知的財産権を本研究の指導教官である田中章司郎教授に譲渡致します。