

衛星画像の幾何補正最適化における位相限定相関法を利用した 平行移動量の評価

Translation Estimation Using Phase-Only Correlation in Optimization of Orthorectified Satellite Image

細井昭快*, 下坂直也*, 齊藤玄敏*

Akiyoshi Hosoi*, Naoya Shimosaka*, Hiroyuki Saito*

*弘前大学

*Hirosaki University

キーワード : 幾何補正(Geometric correction), 位相限定相関法(Phase-only correlation)
最急降下法(Steepest decent method), 衛星画像(Satellite image), DEM 陰影画像
(DEM shadow image)

連絡先 : 〒036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地 弘前大学大学院 理工学研究科 齊藤研究室
齊藤玄敏, Tel/Fax:(0172)-39-3694, E-mail: saito@cc.hiroyuki-u.ac.jp

1. はじめに

衛星画像には広い地域を定期的に観測できるという利点があり,その画像には有益なデータが様々含まれている.その衛星画像に地形図など他の地理的情報を重ね合わせる事により衛星画像をより付加価値の高いデータにする事が出来る.しかし,未処理の衛星画像には幾何的な歪みが含まれているので,衛星画像に幾何補正をする必要がある.

衛星画像の幾何補正法の一つに最適化法¹⁾がある.この方法は,地形の起伏及び地球の曲率を考慮して精密幾何変換を行った衛星画像と,数値標高モデル(Digital Elevation Model)から得られた直達日射照度のシミュレーション画像(DEM 陰影画像)との相関値を評価関数として座標変換式を最適化している.また,この方法は,衛星の位置ズレに起因するシステム情報のシーンセンタのズレを補正する際,最急降

下法によって相関値が最大となる補正量(画像の位置ズレ量)を求めている. Fig.1 に衛星画像と DEM 陰影画像の相互相関関数の三次元表示の例を示す.このように衛星画像と DEM 陰影画像の相互相関関数は多くの起伏を含み,かつピークが先鋭ではない.そのため,このような関数に最急降下法を適用しサブピクセル精度でのピーク検出を行う場合,初期値が適切でないで局所解につかまる問題が生じる.そのため,処理者自らが適切な初期値を決定しなければならないが,それには衛星画像処理の経験が必要になる.さらに,これにより最適化法の処理を自動化出来ないという問題も生じる.

このような問題を解決するために,近年画像センシングなど,様々な分野で使用されてきている位相限定相関法²⁾を最急降下法に代わって適用することを考える.位相限定相関法は,外乱や測定誤差に対してロバストであり,処理

過程において画像間の相関値も算出されるため、画像照合についても有用であることが示されている。

本研究では、位相限定相関法を最適化法に適用し、従来法との比較によって、その特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 幾何補正の最適化

2.1 衛星画像の正射投影画像への変換

衛星画像は中心投影画像であるので、撮影対象に起伏がある場合、Fig.2 に示すように実際の位置(p)が見かけ上の位置(p*)に投影されてしまう。よって、処理対象地域の衛星画像を切り出す際はこの事を考慮する必要がある。以下に衛星画像を正射投影画像に変換し、対象地域を切り出す際に使用する式を示す。

$$\begin{bmatrix} p \\ l \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\alpha & -\cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (X-X_0-\delta x) \\ (Y-Y_0-\delta y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_0-\delta p \\ l_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、(X,Y)は衛星画像の切り出す位置の UTM 座標、(p,l)はその座標の正射投影後の画像座標である。(X₀,Y₀)はシーンセンタの UTM 座標、(p₀,l₀)はシーンセンタの画像座標、(x, y)は最適化法によって推定するシーンセンタのズレ量である。α はそれぞれ衛星画像のオリエンテーション角、分解能、また p は衛星画像が中心投影画像である事に起因する位置ずれの補正量であり、次式によって与えられる。

$$\delta p = 1.1 \frac{h \cdot op}{z} \quad (2)$$

式(2)の係数 1.1 は、地球の曲率の影響を近似するための係数である。今回解析に用いる Landsat 衛星のデータの場合、衛星直下点とシーンセンタが非常に近いので、地球の曲率を考慮しない p に 10%加える事により曲率を精度良く近似できることが飯倉ら³⁾によって示されている。

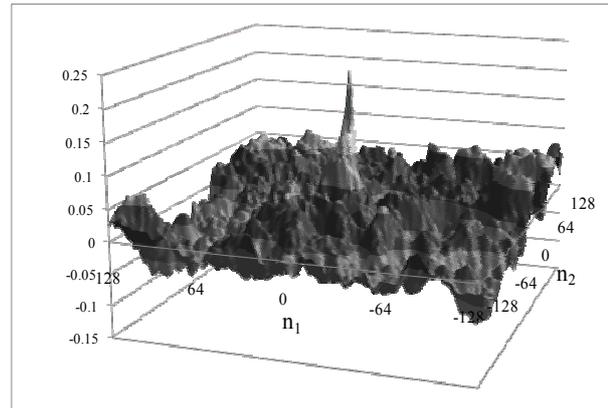


Fig.1 衛星画像と DEM 陰影画像の相互相関関数の三次元形状。3D plot of cross correlation function between a satellite image and its DEM shadow image.

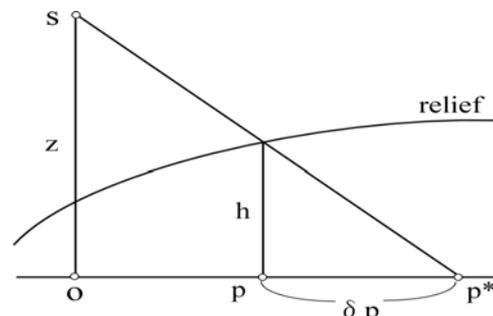


Fig.2 地球の曲率を無視した時の真の位置 p と見かけの位置 p* の関係 (s:衛星位置, z:衛星高度, o:衛星直下点, h:標高)。Relation of a true position(p) and its apparent position(p*) in the case of neglecting the earth curvature (s:satellite position, z:satellite altitude, o:directly under point of satellite, h:altitude)。

2.2 利用した DEM の諸元と DEM 陰影画像の作成

数値標高モデル(DEM)とは、地表面の標高を決められた間隔ごとに記録したデータのことである。先述の通り、衛星画像の正射投影画像を作成するためには、対象地域の標高情報が不可欠である。本研究では、国土地理院発行の「数値地図 50m メッシュ(標高)」を用いる。

「数値地図 50m メッシュ(標高)」は 2 万 5 千分の 1 の地形図を緯度方向、経度方向にそれぞれ 200 等分に格子分割し、各格子の標高を 0.1m 刻みで表したデータである。地形図をもとに作成されているので、幾何的に正確であり、それ

から作成した DEM 陰影画像は衛星画像の幾何補正の評価に最適である。

DEM 陰影画像は衛星画像が取得された時の直達日射照度分布を DEM と太陽方位から再現した画像である。以下に DEM と太陽方位から直達日射照度を求める式を示す。

$$\cos\beta = \cos\theta \sin e + \sin\theta \cos e \cos(\varphi - A) \quad (3)$$

ここに、 β は太陽入射角、 θ , A はそれぞれ DEM から求める地表面の斜度と傾斜方位であり、 e , φ はそれぞれ衛星画像のシステム情報から得られる太陽の高度角と方位角である。DEM の各画素における $\cos\beta$ を計算することで DEM 陰影画像が得られる。Fig.3 に DEM と DEM 陰影画像の例を示す。

2.3 位相限定相関法とピーク検出

正射投影変換した衛星画像と、DEM 陰影画像の相対的な位置ズレ量(平行移動量)を位相限定相関法によって推定する。以下に二つの画像 d , e が与えられた時の位相限定相関法の処理手順を示す²⁾

1) : 入力画像をそれぞれフーリエ変換する(変換後の画像をそれぞれ D, E とする)。

$$\mathbf{D}(k_1, k_2) = \text{FFT} \{ \mathbf{d}(n_1, n_2) \} \quad (4)$$

$$\mathbf{E}(k_1, k_2) = \text{FFT} \{ \mathbf{e}(n_1, n_2) \} \quad (5)$$

2) : (1),(2)をそれぞれ振幅で正規化する(正規化したものをそれぞれ、 NOD, NOE とする)。

$$\mathbf{NOD}(k_1, k_2) = \frac{\mathbf{D}(k_1, k_2)}{|\mathbf{D}(k_1, k_2)|} \quad (6)$$

$$\mathbf{NOE}(k_1, k_2) = \frac{\mathbf{E}(k_1, k_2)}{|\mathbf{E}(k_1, k_2)|} \quad (7)$$

3) : 正規化相互パワースペクトル(R)を算出する。

$$\mathbf{R}(k_1, k_2) = \mathbf{NOD}(k_1, k_2) \cdot \overline{\mathbf{NOE}(k_1, k_2)} \quad (8)$$

4) : 求めたパワースペクトルを逆フーリエ変換し、位相限定相関関数を得る。

$$\mathbf{r}(n_1, n_2) = \frac{1}{n_1 \cdot n_2} \text{IFFT} \{ \mathbf{R}(k_1, k_2) \} \quad (9)$$

ここに、式中の n_1, n_2 は画像の x, y の各画素数であり、 k_1, k_2 は波数である。Fig.4 に位相限定相関関数の三次元表示の例を示す。使用画像は、衛星画像と DEM 陰影画像である(以下、位相限定相関関数を POC 関数と記述する)。ここで、ピークの座標は、画像の相対的移動量を表し、ピーク値は画像の位相差スペクトルの線形性を表す。図から明らかなように、POC 関数は極めて鋭い相関ピークを有しており、その検出は極めて容易である。この際、位相限定相関法で得られる画像移動量は一画素単位なので、本研究では POC 関数のピークの前後二点、計三点を用いて二次関数によるフィッティングを行い、サブピクセル精度で移動量を算出する。

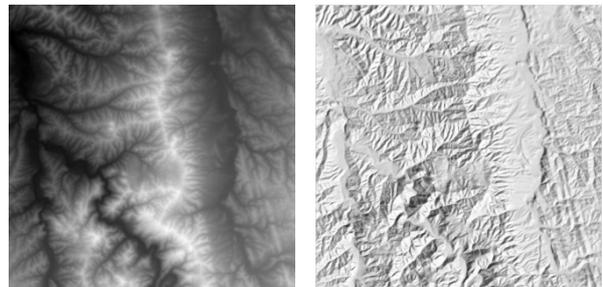


Fig.3 数値標高モデル(左)と DEM 陰影画像(右)の例。Representative of digital elevation model(left) and its DEM shadow image(right).

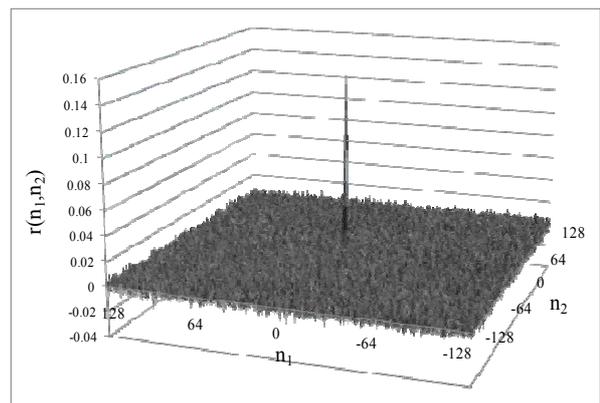


Fig.4 衛星画像と DEM 陰影画像の POC 関数の三次元形状(移動量 = 0 の場合)。3D plot of POC function between a satellite image and its DEM shadow image (in the case of offset=0).

3. 精度評価方法と使用した衛星画像

最急降下法、位相限定相関法によって同じ領域の衛星画像と DEM 陰影画像のマッチング

を行い,移動量を比較する事によって精度の検討を行った.

最急降下法は与えた初期値から相関値が高くなる方向に少しずつ画像を移動させ,相関値が最も高くなる移動量を探し,繰り返し計算によって順次算出した相関係数の差が設定した閾値以下(本研究では 1×10^{-5} とした)になった時の移動量を解とする.ただし,最急降下法は初期値が適切でないとな局所解につかまる事が多々ある.これを避けるため,本研究では最初に位相限定相関法によって移動量を算出し,その値を最急降下法の初期値として与えた.

一方,位相限定相関は移動量を一回の計算で求めることが出来るが,得られた移動量を用いて処理を繰り返し,得られた移動量が設定した閾値以下(本研究では 0.5m とした)になった時の移動量を解とする.また,得られた移動量が閾値以下に収束しない場合は 50 回の繰り返し計算をもって処理を終了し,その中で最も閾値に近いものを解とした.なお,最急降下法,位相限定相関法ともに繰り返し計算の際,シーンセンタの座標を更新するため,衛星画像の正射投影変換を毎回行っている.それぞれの処理の流れを Fig.5 に示す.

使用した衛星画像は Landsat-5 TM の 2000/7/11 撮影の青森県周辺(太平洋側)の標準処理データである. Fig.6 にそのバンド 5 の画像を示す.図中の A~D は解析に用いたサブシーンの位置である.また,使用したバンドは 5 及び 3 であり,処理サイズは 256×256 である. Table.1 に衛星画像の幾何変換パラメータを示す.

4. 評価結果

4.1 精度評価

Table.2 に各サブシーンにおける二つの方法の移動量とその差をバンドごとに示す.表中の単位は全て[m]である.バンド 5, 3 全体で,最大の移動量の差はバンド 3 におけるサブシ-

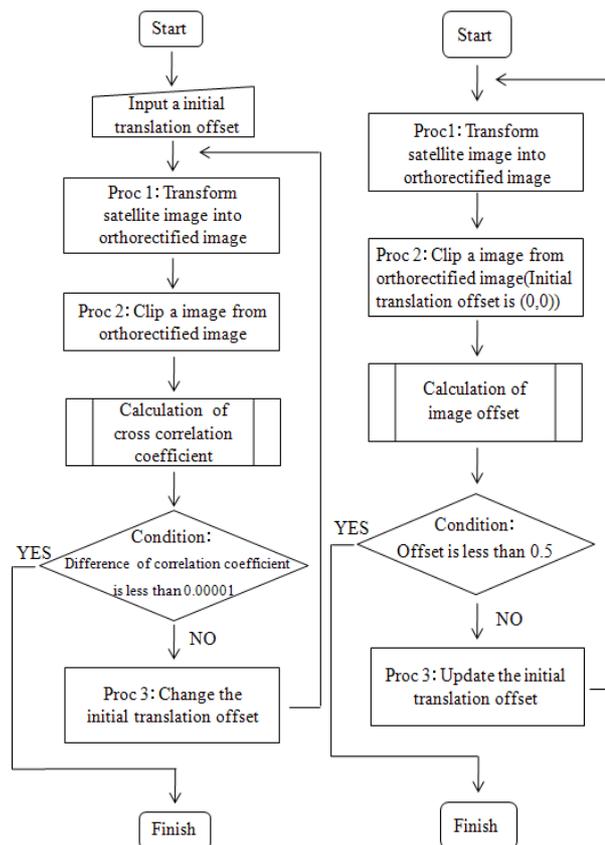


Fig.5 最急降下法(左)と位相限定相関法(右)の処理の流れ. Processing flows of SDM(left) and POC(right).

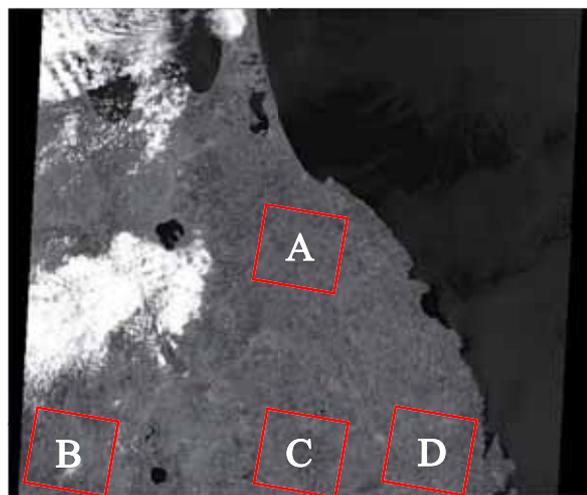


Fig.6 解析に利用した衛星画像(バンド 5)及び解析場所. Satellite image used for analysis (band-5) and analysis place.

Table.1 衛星画像の幾何変換パラメータ. Parameter of geometric transformation of satellite image.

UTM scene center[m]	x_0	534087.6	orientation angle[deg]	α	10.6862
	y_0	4462557	sun elevation [deg]	θ	61
image scene center[pixel]	P_0	3492	sun azimuth[deg]	A	121
	l_0	2983.5			

ン B の y 方向の-14.341m である。今回解析に用いた衛星画像は 1 画素 28.5m なので、画素に換算すると約 0.5 画素であるので十分に小さいと言える。また、バンド 3 はバンド 5 に比べ全体的に二つの方法の移動量の差が大きい。しかし、バンドごとの差の平均は、バンド 5 では x, y 各方向に、それぞれ画素に換算して 0.015 画素, 0.097 画素、バンド 3 ではそれぞれ 0.152 画素, 0.021 画素と非常に小さい。

次に、Table.3 に各サブシーンにおける二つの方法の平行移動量の標準偏差とその差をバンドごとに示す。表中単位は[m]である。標準偏差は各サブシーン、バンドごとに二つの方法の差の大小が異なる。またバンド 3 はバンド 5 に比べ全体的に差が大きい。しかし、バンドごとの平均で見れば、バンド 5 の x 方向以外、全て位相限定相関法の方が標準偏差が小さい。よって、標準偏差は位相限定相関法の方が小さいと言える。

以上の結果から、最適化法に位相限定相関法を適用した場合、最急降下法と同等の結果が得られる事がわかった。

4.2 処理効率の評価

Table.4 に解析に用いた全てのサブシーンにおいて、処理に要した平均回数、平均時間を二つの方法ごとに示す。表中の時間の単位は「秒」である。計算回数は最急降下法が約 15 回、位相限定相関法が約 6 回であることから、位相限定相関法は最急降下法に比べ 2 分の 1 以下の計算回数で済むことが分かる。処理時間は、最急降下法が約 37 秒、位相限定相関法が約 17 秒である。こちらも位相限定相関法は最急降下法に比べ 2 分の 1 以下の処理時間で済むことが分かる。ただし、処理時間は使用 PC の性能に依存する。本研究で用いた PC の CPU は Pentium(R)-4, 2.60[GHz]である。

Fig.7 に各方法で処理した際の解の収束過程を示す。比較のため位相限定相関法、最急降下

Table.2 各サブシーンにおける二つの方法の移動量とその差(上:バンド 5,下:バンド 3) . Offset obtained by each method and its difference (Top: band-5, Bottom: band-3).

		band-5				
		A	B	C	D	average
SDM	x1[m]	-1326.534	-1378.576	-1343.092	-1341.784	-1347.497
	y1[m]	564.726	429.108	582.570	653.283	557.421
POC	x2[m]	-1326.261	-1374.548	-1341.894	-1345.570	-1347.068
	y2[m]	555.713	431.816	579.806	651.262	554.649
difference	x1-x2[m]	-0.273	-4.028	-1.198	3.786	-0.428
	y1-y2[m]	9.013	-2.708	2.763	2.021	2.772

		band-3				
		A	B	C	D	average
SDM	x1[m]	-1319.449	-1374.200	-1321.395	-1330.780	-1336.456
	y1[m]	565.785	417.724	582.915	658.132	556.139
POC	x2[m]	-1312.261	-1369.378	-1319.224	-1327.614	-1332.119
	y2[m]	557.387	432.065	581.322	651.429	555.551
difference	x1-x2[m]	-7.188	-4.822	-2.171	-3.165	-4.336
	y1-y2[m]	8.398	-14.341	1.593	6.704	0.589

Table.3 各サブシーンにおける二つの方法の移動量の標準偏差とその差(上:バンド 5,下:バンド 3) . Standard deviation of offset obtained by each method and its difference (Top: band-5, Bottom: band-3).

		band-5				
		A	B	C	D	average
SDM	x1[m]	2.084	2.149	1.708	1.780	1.930
	y1[m]	6.193	5.496	5.691	5.868	5.812
POC	x2[m]	2.276	1.926	2.144	2.735	2.271
	y2[m]	3.925	6.969	6.593	4.369	5.464
difference	x1-x2[m]	-0.193	0.223	-0.436	-0.955	-0.340
	y1-y2[m]	2.268	-1.473	-0.903	1.499	0.348

		band-3				
		A	B	C	D	average
SDM	x1[m]	4.750	9.013	4.722	7.816	6.575
	y1[m]	6.788	8.723	6.957	9.849	8.079
POC	x2[m]	2.969	5.324	2.244	4.074	3.653
	y2[m]	3.858	6.710	7.946	6.654	6.292
difference	x1-x2[m]	1.781	3.689	2.477	3.741	2.922
	y1-y2[m]	2.930	2.013	-0.989	3.195	1.787

法共に最適解から離れた同値の初期値を与えた。この場合、位相限定相関法は最初の処理でほぼ最終解に到達し、その後数回の処理で最終解に到達している。一方、最急降下法は増減を繰り返しながら除所に最終解に近づき、先述した最急降下法の計算回数よりはるかに多い 40 回の繰り返し計算を要している。よって、目視による初期値で解析を行った場合、解析者の経験が少ないと最急降下法は今回よりさらに計算回数、時間ともに増える事が予想される。

以上から、最急降下法に比べ、位相限定相関法は格段に処理効率が良いと言える。

Table.4 二つの方法での計算回数、計算時間の差。Difference in iteration numbers and processing time between two methods.

	SDM	POC	difference
Iteration numbers	15.26	6.18	9.08
Processing time[s]	37.31	17.37	19.94

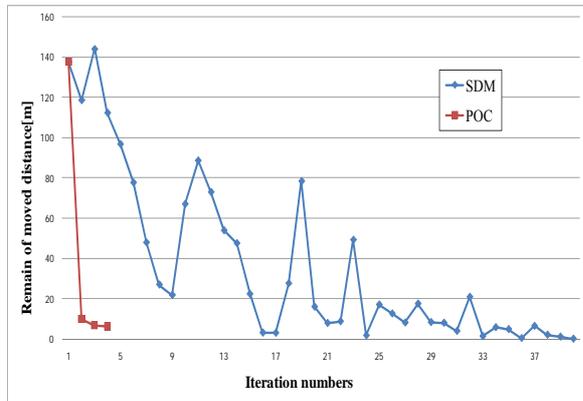


Fig.7 二つの方法の処理過程の比較。Convergence process for SDM and POC.

5. まとめ

本研究では、Landsat-5 TM の衛星画像と DEM 陰影画像のマッチングに位相限定相関法を適用し最急降下法との比較によって、位相限定相関法の特徴について検討した。これによって、以下の特徴が明らかとなった。

1. 位相限定相関法の位置合わせ精度は、従来法である最急降下法のそれと比較して同等である。
2. 位相限定相関法を最適化法に適用した場合、初期値が必要ないので解析を全自動で行うことができる。
3. 位相限定相関法の処理時間は、最急降下法の2分の1以下であり、大幅に処理時間を短縮できる。

このように、最適化法に位相限定相関法を適用した場合、最急降下法を用いた最適化法と同等の位置合わせ精度を持ち、かつ従来の問題点を解決でき、処理効率も大幅に改善する事が明らかとなった。

今後は、他バンドでの解析、また他の衛星画像に適用した場合などについても解析を行い、

本法の有用性を確かなものにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 飯倉善和：数値標高モデルを用いたランドサット TM 画像の幾何補正の最適化，Journal of Remote Sensing Society of Japan, vol.22(2), pp.189-195, 2002.
- 2) 青木孝文,伊藤康一,柴田琢磨,長島聖：位相情報に基づく高精度マシンビジョン，Fundamentals Review Vol.1(1), pp.33-39, 2007.
- 3) 飯倉善和,横山隆三：ランドサット TM 画像の正射投影とその評価，写真測量とリモートセンシング,Vol.37(4), pp.12-22, 1998.
- 4) 木村仁志,齊藤玄敏,飯倉善和：ヒストグラム均一化による幾何補正最適化における相関値向上の試み，日本リモートセンシング学会第43回学術講演会論文集, pp.41-44, 2007.