

ランドサットTMデータの幾何的な精度 Geometric Accuracy of Landsat TM Data

飯 倉 善 和

Yoshikazu Iikura

弘前大学

Hirosaki University

キーワード： 直達日射照度(direct solar irradiance), 正射投影(ortho-projection), 空間相関 (spatial correlation), 最適化 (optimization), 画像中心のズレ (scene center displacement)

連絡先：〒036-8561 弘前市文京町3 弘前大学理工学部知能機械システム工学科
飯倉善和、Tel & Fax : 0172-39-3682, E-mail : iikura@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

ランドサットTM (4号&5号) は、性能の高さと継続性 (1982年～) から現在最も良く利用されている光学センサである。また、1999年に打ち上げられたランドサット7号には、その後継センサであるETM+ が搭載されている。

宇宙開発事業団から提供されるランドサットTMの標準処理データには衛星画像を地図上 (UTM座標系) に投影するために必要な幾何変換のパラメータが含まれている¹⁾。通常、この情報に基づく幾何変換 (システム幾何変換) ではかなりの誤差が生じる²⁾。したがって、幾何的な精度を要求される場合には、複数のGCP (地上制御点) から統計的に推定される幾何変換式を用いた精密幾何補正 (正射投影を含む) を行わなければならないとされてきた³⁾。しかし、人手を介したGCPの取得は非効率であり、かつ熟練者が行わない場合には高い精度は期待できない。

GCPの衛星画像上の対応点を自動的に決定する方法としては、デジタル化された地図上の海岸線と衛星画像の水域と陸域の境界をマッチングさせるやり方が良く知られている⁴⁾。また起伏の大きな地形に対しては、数値標高モデル (DEM) と衛星画像撮影時の太陽位置から計算できる直達日射照度を利用した方法が提案されている⁵⁾。しかし、マッチングは自動化できても、地図上のGCP自体の選択に恣意性が残ることは避けられない。また、GCPの選択後に幾何変換式の統計的な推定と実際の衛星画像の再配列という複数の手順が必要となる。

著者は、GCPを取得するという従来の精密幾何補正の考えを脱却して、正射投影を考慮した幾何変換後の衛星画像と直達日射照度画像との相関係数を評価関数として幾何変換式のパラメータを直接に最適化する方法を提案している⁶⁾。

本論文では、この方法を紹介すると共に、複数のランドサットTMデータに本方法を適用して得られる標準処理データの位置ズレを解析することにより、その幾何学的な精度の定量的な評価を行う。

2. 幾何補正の評価と最適化

衛星画像の幾何補正は、幾何変換式の決定と再配列の2つのプロセスからなる²⁾。幾何変換式は入力画像上の座標 (ピクセル番号pとライン番号l) と地図座標 (x座標とy座標) の関係を表す式であり、次のようなアフィン変換式がよく用いられる。

$$p = ax + by + c \quad (1a)$$

$$l = dx + ey + f \quad (1b)$$

従来、これらのパラメータ (a,b,c,d,e,f) はあらかじめ選択した複数のGCPデータ (p,l,x,y) から最小2乗法を用いて決定されてきた。また、この際に生じる残差の標準偏差が幾何補正の評価として利用されることが一般的であった。すなわち、残差の標準偏差が大きければ、その幾何変換式は不適切であるということになる。その場合には、残差の大きなGCPを捨てたり、新たなGCPを選択する必要がある³⁾。

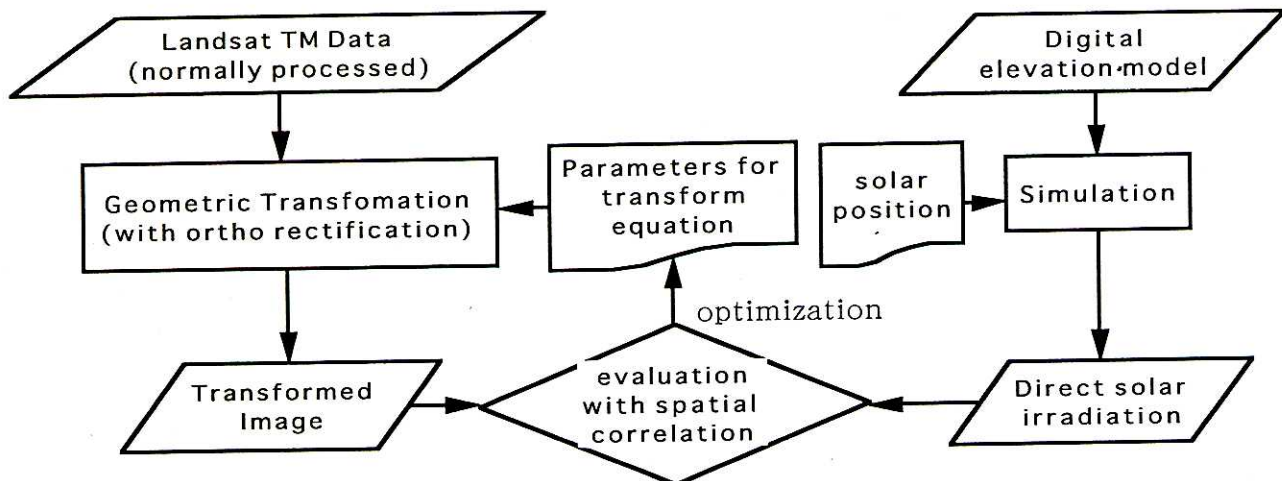


Fig.1 Flow diagram for evaluating geometric correction of a satellite image with direct solar irradiance image

再配列では、出力画像の格子点座標 (x,y) を幾何変換式に従って入力画像の座標 (p, l) に変換する。この時の p や l は整数とならないため、周囲の画素値から内挿により新しい画素値を決定しなければならない。

これに対して、新たな方法では再配列を行って得られる出力画像とシミュレーションにより作成する直達日射照度画像との相関係数を幾何補正の評価に利用する⁵⁾。相関係数は位置決めが正しい程大きくなるため、変換式のパラメータを最適化することが可能となる。Fig.1 に提案する方法をデータ処理の流れ図で表した。最適化は相関係数が大きくなるようにパラメータを探索することによって実現される。ただし、パラメータの探索毎に再配列が必要となるため計算時間に対する考慮が必要となる。

2. 1 直達日射照度の計算

太陽入射照度 $\cos \beta$ は、太陽位置 (天頂角 θ と方位角 A) と地表面の斜度 e と傾斜方位 ϕ の関数として以下のように与えられる。

$$\cos \beta = \cos \theta \cos e + \sin \theta \sin e \cos(\phi - A) \quad (2)$$

斜度と傾斜方位を求めるにはDEMが必要となる。これには国土地理院から発行されている数値地図 50 m メッシュ (標高) が全国的に安価に利用できる。ただし、格子点 (メッシュ) は等間隔の緯度と経度により構成されており、サイズが約 50 m である。したがって、これをランドサットTMの画像処理に利用するには、投影変換 (UTM座標系) および再配列 (空間解像度 30 m) が必要になる⁶⁾。

Fig.2 に太陽の高度角が 58 度、方位角が北から

時計周りの方向に 112 度の場合の直達日射照度画像の例を示す。この例は、以下の幾何補正に利用する衛星画像の撮影時に対応した値である。

2. 2 システム情報と幾何変換式

ランドサットTMの標準処理データに付属するリーダファイルの地図投影アンシナリーレコードには、シーンセンターのUTM座標 (x_0, y_0)、UTM座標系に対する回転角 (オリエンテーション角 θ_0)、および空間解像度 (Δ) が含まれている⁷⁾。これらの情報を用いれば、以下の式を用いて任意の地



Fig.2 Simulated image of direct solar irradiance from digital elevation model and solar position. Digital numbers in square region are used for the calculation of spatial correlation

図上のUTM座標 x , y を衛星画像上の位置（ラインおよびピクセルに）に変換（いわゆる逆変換）することができる²⁾。

$$p - p_0 = ((\cos \theta_0 * (x - x_0) - \sin \theta_0 * (y - y_0)) / \Delta) \quad (3a)$$

$$l - l_0 = (-\sin \theta_0 * (x - x_0) - \cos \theta_0 * (y - y_0)) / \Delta \quad (3b)$$

システム情報に基づいて標準処理データを幾何変換した結果の例をFig.3に示す。Fig.2と比較すると右下の方向にずれているのが分かる。

2. 3 位置ズレの最適化

(3) 式の p_0 および l_0 をそれぞれ δp と δl だけ変化させることにより、衛星画像の位置を調整することができる。この時、直達日射照度画像との間の相関係数は位置ズレはが小さくなるほど大きくなることが期待されるため、最適化の評価関数として利用できる。評価関数の形状を確認するため、 δp を36から0.1刻みで41まで、 δl を29から34まで0.1刻みで変化させて、幾何変換を行った。それらの出力画像の中心（500x500）のすべての画素を用いて相関係数を計算した。その結果（地点E）を等値線であらわしたものがFig.4である。

この範囲で相関係数は0.3から0.7と大きな変化を示しており、1画素以下の変化が幾何補正に影響を与えていることが分かる。また最大値の付近は単峰性できれいな対称性を示している。これは最



Fig. 3 Satellite image corrected according to system information. Displacement (36 pixels and 31 lines) is found by searching maximum spatial correlation in square regions.

適解を見つける上で好ましい性質である。

最適解の計算は、IDL (Ver5.3)⁷⁾に組み込まれているPowellの方法⁸⁾を用いて行った。Fig.4に示したデータでは、 δp は39.295、 δl は31.216（相関係数は0.7125）が得られた。計算に要した時間は、アップル社の iBook 上で約30分（再配列を含む134回の探索）であった。なお、幾何変換における地形の起伏の影響については、飯倉ほか⁹⁾による近似的なアルゴリズムを用いた。

本方法を利用すれば、衛星画像の精密幾何変換を0.1画素以下の単位で調整し、最適なパラメータを決定することができる。従来のGCPの対応点の計測および幾何変換式の決定で利用する標本数は限られていたのに対して、本方法では多数の標本（500x500）を利用しているため、得られる結果は統計的に見て非常に安定したものとなる。また、この性質を利用して、バンド間の位置ズレ、正射投影の効果、地点毎の最適解の変化、回転の効果などが解析できる。

3. 利用した衛星画像と対象地域

パス102, ロウ32での18のランドサットTMデータを用いて提案する幾何補正法の評価を行った。衛星画像の範囲内にある起伏の大きな8ヶ所の山岳地帯を解析の対象とした。各地点毎に18km四方の対象範囲を設定した。衛星の範囲および対象地域の位置をFig.5に示した。

使用した衛星画像の撮影日時と平均的な位置ズレ（ δp と δl ）および各地点の相対的な位置ズレをTable 1に示した。いずれの衛星画像に関しても平均的に大きな誤差が見られる。時間的にはピクセル方向の誤差が系統的に増大しているのに対して、ラ

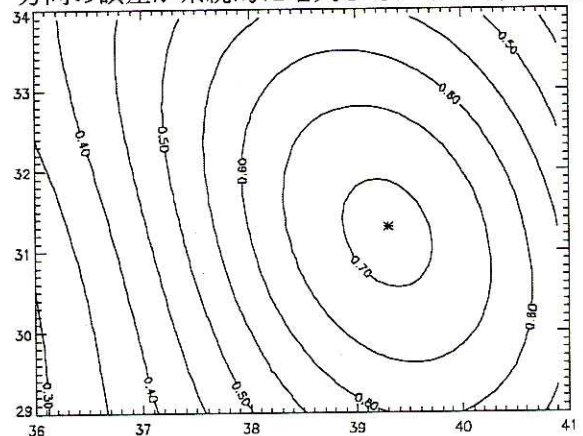


Fig. 4 Contour map of spatial correlation with respect to scene center displacement z (δp and δl)

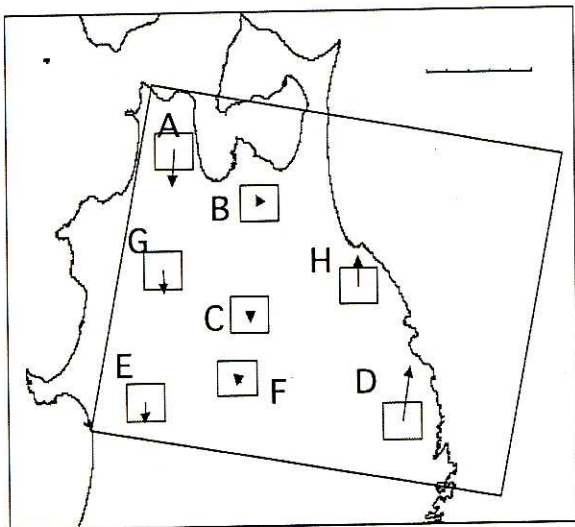


Fig.5 Eight study areas and satellite image coverage with relative change of optimal displacements among study areas.

イン方向の誤差には負の値がでるなど異常とも思える変化が見られる。地点間のバラツキについても、ピクセル方向に比べてライン方向のバラツキが大きい。とくに1998年と2000年のデータに関しては、それ以前のデータに比べて大きなバラツキが見られる。1997年にNASADAがランドサットTMの処理システムを更新したがその影響が懸念される。

Fig.5に各地点間の相対的な変化の典型的な例を示した。ピクセル方向の変化はほとんどないが、ライン方向では東側の地点と西側の地点で明らかな違いが見られる。このような系統的な誤差は最適化のパラメータを増やすことにより補正することが可能である。

6. まとめ

本研究では、衛星画像に見られる陰影が数値標高モデルを用いて再現できることに着目することにより、精密な幾何補正を実現する方法を提案した。数値標高モデルから再現される陰影画像(直達日射照度)は幾何的に正確であるため、衛星画像の幾何変換の精度を陰影画像との空間的な相関係数で評価することができる。評価関数が定量的に定義できれば、幾何変換の問題は幾何変換式のパラメータの最適化の問題となる。

この考えをランドサットTMの標準処理データに適用するにあたっては、付属するシステム情報に含まれる地図投影に関する情報に、平行移動(シーンセンターの変化)と地上の起伏による位置ズレ(正射投影)を加味した変換を検討した。実データを用

いた解析で、対象とする範囲がそれほど広くない場合には、平行移動による最適化によって1画素以内の正確な幾何変換ができることを示すことができた。平行移動量の最適値は0.1画素以下の単位で探索したが、相関係数の計算に多数の標本(画像全体)を利用しているために、統計的に偏りのない非常に安定した結果が得られる。

提案する方法をパスやロウの異なる複数のランドサットTM画像に適用した結果、1998年以降の2シーンを除いて、2つのパラメータ(シーンセンター)のみの最適化で満足できる結果が得られた。しかし、広域を対象とする場合やより精度の高い幾何的精度を求める場合には回転や拡大・縮小なども考慮する必要があるだろう。その際には、計算時間の効率化の問題とも真剣に取り組まざるを得ない。

本方法の問題点として、初期値が最適解と離れていると探索がうまくいかず、最適解を発見できない点がある。現在はシステム補正後の画像と直達日射照度のシミュレーション画像の位置ズレを目視により推定しているが、これでは幾何補正を完全に自動化することにならない。今後、これらの課題に取り組むと共に、ランドサット7号を含む他の衛星の幾何補正への適用についても検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 宇宙開発事業団：『LANDSAT TM データフォーマット説明書』、1996
- 2) 飯倉善和、横山隆三：数値標高モデルを用いた衛星画像の地上制御点の同定、写真測量とリモートセンシング、Vol.37, No.6, pp.12-22, 1999
- 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, No.4, pp.12-22, 1998
- 4) 曾根光男、坂内正夫、高木幹雄：気象衛星NOAA画像と海岸線データとの位置合わせ処理の高速化、テレビジョン学会誌、Vol.43, No.9, pp.957-966, 1989
- 5) 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、日本リモートセンシング学会誌、Vol.22, No.2, pp.189-195, 2002
- 6) 飯倉善和：数値標高モデルの投影変換に用いる内挿法の評価、日本リモートセンシング学会誌、Vol.21, No.2, pp.150-157, 2001
- 7) J.L.Stark, F. Murtagh, and A. Bijaouri, Image Processing and Data Analysis, Cambridge University Press, 1998
- 8) W.H.Pressl, et al. : Numerical Recipes (FORTRAN Version), pp.294-300, Cambridge University Press, 1989

Table 1 Optimized displacement parameters for Landsat TM images

(a) pixel direction δp

date	mean	S.D.	A	B	C	D	E	F	G	H
840426	15.77	0.50	-0.44	-0.10	-0.54	0.72	-0.37	0.16	----	0.58
840816	15.80	0.21	0.03	-0.06	-0.18	0.30	-0.16	0.20	-0.33	0.20
850107	15.03	0.96	---	-0.70	1.65	-0.26	----	-0.61	---	-0.07
850208	16.13	0.39	---	----	-0.17	0.37	-0.45	---	-0.19	0.45
850616	11.54	0.20	-0.06	-0.07	-0.34	0.26	-0.18	0.24	0.09	0.06
851022	23.20	0.37	-0.39	-0.14	-0.23	0.19	0.72	0.04	-0.37	0.17
870521	18.85	0.34	0.03	-0.08	-0.17	0.55	-0.15	0.21	-0.60	0.22
900614	32.38	0.16	-0.14	0.23	-0.16	0.12	0.12	0.12	-0.14	-0.16
910601	44.04	0.23	-0.12	-0.01	-0.05	0.24	0.21	0.23	-0.42	-0.08
931028	40.20	0.22	0.04	-0.08	-0.43	0.26	0.09	0.21	-0.18	0.07
940422	39.40	0.59	0.02	-0.36	0.01	0.36	0.24	0.47	-1.28	0.52
940524	40.67	0.27	-0.26	-0.19	-0.27	0.12	-0.09	0.25	0.50	-0.06
950612	39.24	0.18	-0.08	-0.08	-0.16	0.39	0.04	-0.15	0.08	-0.03
960529	34.27	0.25	0.34	0.09	-0.08	0.06	-0.01	0.08	-0.49	---
971023	29.25	0.25	-0.21	0.09	-0.06	0.39	-0.28	-0.14	-0.13	0.36
971226	27.36	0.41	-0.49	-0.20	0.12	0.48	-0.53	0.26	-0.15	0.51
990810	40.33	3.61	5.533	3.98	-0.78	-3.09	-4.42	0.95	-3.54	1.36
000711	48.54	1.83	----	2.65	-0.29	-1.25	-2.07	1.54	-1.82	1.24

(b) line direction δp

date	mean	S.D.	A	B	C	D	E	F	G	H
840426	23.33	1.41	1.46	-0.28	-0.38	-2.39	1.05	1.04	----	-1.26
840816	37.36	1.36	1.56	0.10	-0.15	-2.33	1.25	1.11	-0.08	-1.47
850107	34.44	2.21	---	-0.33	3.23	-2.40	----	0.99	---	-1.49
850208	42.02	1.22	---	----	0.28	-1.58	1.51	---	0.63	-0.84
850616	41.89	1.20	1.04	0.06	-0.04	-2.16	1.18	1.16	0.00	-1.24
851022	36.97	1.37	1.52	0.28	-0.15	-2.49	1.11	1.20	-0.11	-1.38
870521	38.62	1.48	1.44	0.18	-0.10	-2.74	1.21	1.34	0.23	-1.57
900614	-33.39	1.56	1.47	-0.01	-0.05	-2.81	1.55	1.44	-0.02	-1.56
910601	50.10	1.52	1.37	0.03	-0.03	-2.73	1.45	1.51	-0.05	-1.56
931028	16.99	1.35	1.52	0.29	-0.24	-2.44	1.15	1.13	-0.05	-1.36
940422	43.27	1.53	1.35	0.30	-0.06	-2.82	1.20	1.37	0.40	-1.74
940524	39.91	1.52	1.61	-0.07	-0.07	-2.68	1.34	1.34	0.20	-1.66
950612	30.08	1.48	1.81	0.25	-0.15	-2.65	1.13	-0.18	1.24	-1.44
960529	8.56	1.49	1.39	-0.05	-0.37	-3.01	1.10	1.04	-0.10	---
971023	23.31	1.51	1.69	0.31	-0.17	-2.74	1.26	1.21	-0.02	-1.53
971226	18.48	1.38	1.48	0.34	-0.13	-2.57	1.13	1.21	-0.13	-1.32
990810	-53.04	7.01	-7.45	-0.88	-1.05	10.77	-7.58	-7.66	-1.27	7.67
000711	7.00	5.48	----	-0.52	-0.43	8.73	-5.78	-6.46	-0.83	5.28