

ランドサットTM画像におけるスキャンストライプノイズの解析 Analysis of scan stripe noise in Landsat TM images

○飯倉 善和
弘前大学

○Yoshikazu Iikura
Hirosaki University

Abstract: In Landsat TM images, scan stripe noise often appears every 16 lines at the both side of white objects such as cloud, which not only visually degrades the images but also makes quantitative analysis difficult. As the TM employs bidirectional scanning with 16 detectors per band arranged in along track direction, the noise is associated with the scan direction and is referred as the scan stripe noise. In this paper, we assume the impulse response of AD converter (offset voltage) as the noise source, and model the scan stripe noise mathematically. The parameters of the response are estimated from the night time data and they are applied to the day time data to remove its scan stripe noise.

キーワード：AD変換器(AD converter)、過渡応答(transient response)、時定数(time constant)、走査方向(scan direction)、差分方程式(difference equation)

連絡先：〒036-8561 青森県弘前市文京町3番地 弘前大学理工学部
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5号(1984-2003)には光学センサーとしてTM(Thematic Mapper)が搭載されている。このセンサーは可視から熱赤外までをカバーする7つのバンドを持ち、刈り幅180kmの地表面データを30mという空間分解能で取得する。性能が打ち上げ当時の最先端であったというだけでなく、過去20年にわたるデータの蓄積は他の地球観測衛星センサーの追従を許さない貴重な財産であり、地域環境の経年変化の解析に有用な情報を提供することが期待されている。

ところで、宇宙開発事業団から一般に提供されているランドサットTMデータから、応用分野の解析に耐える情報を取り出すためには、各種ノイズの補正・幾何補正・放射量補正などの前処理を精密に行う必要がある。

とくに補正が必要なノイズとしてスキャンストライプノイズがある。これは、センサーが放射輝度の

高い雲などの上を走査した時に、走査線の両側にスキャン単位の横縞があらわれる現象である。Fig.1にスキャンストライプを模式的に示した。

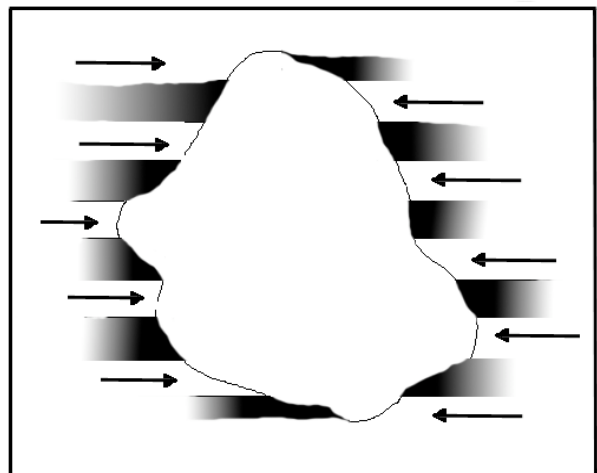


Fig.1 Schematic representation of scan stripe noise

なお、宇宙開発事業団から提供される衛星データは、システム補正以上の処理はほとんど行われていない。応用分野での研究者にとって、各種補正が行われていない衛星データの利用価値は低く、かといって高次の処理は負担が大きい。これが、衛星データの利用を制約する大きな要因になっている。

著者らは、これまで精密幾何補正や大気/地形効果補正の重要性を指摘するとともに^{1)、2)、3)}とともに、リモートセンシングの測定原理に基づいた実用的な補正方法^{4)、5)、6)、7)}を提案してきた。本論文では、センサーに起因するノイズとして知られているスキャンストライプ⁸⁾の性質を紹介するとともに、その簡便な補正方法を提案する。

2. TMの走査方式と雑音モデル

ランドサットTMは機械走査型の放射計で、熱赤外を除く各バンドに、16個の検知素子が使われている⁸⁾。2次元的なデータの取得は衛星の進行(ライン)とそれに直角方向のスキャンミラー(ピクセル)により行われるが、データの取得を高速化するために、走査にはミラーの回転ではなく往復運動(振動)を利用している。したがって、スキャン(16ライン)毎に走査の方向が異なることになり、幾何的な処理が複雑になるだけでなく、放射量補正でも注意が必要となる。

スキャンストライプノイズはセンサーが輝度の高い雲などの上を走査したとき、雲の両側にスキャン単位の横縞状の模様として顕著にあらわれる。当初から、この原因としては検知素子の過渡応答特性ではないかといわれてきた⁹⁾。

2.1 データに対する走査方向の影響

検知素子の過渡応答が原因であるとすれば、雲のあるなしにかかわらずに衛星データはその影響を受けていることになる。事実、雲がない場合でも昼間のデータにおいてDNがスキャン方向にたいして減少(droop)し⁹⁾夜間のデータではわずかに増加(rise)する傾向が見られることが報告されている¹⁰⁾。

夜間、可視/近赤外センサーへの入力ほとんどない状態でDNが変化した原因は、校正用の標準のランプである。3個あるランプの点灯状況に比例して、変化の大きさが異なることが示された¹⁰⁾。変化の早さ(時定数)は、一定で約1000ピクセル(10msec)あった。ただし、変化の大きさはランプが3つとも点灯した場合でもDNで0.15以下と非常に小さいものであった。

一方、昼間のデータでは平均が62DNのデータにおいて、前方スキャンと後方スキャンとの間に東端

で-1.5カウントの差が見られたことも報告されている⁹⁾。

2.2 これまでのモデルと補正法

検知素子の過渡応答が与える影響については、飯倉ら¹¹⁾が光電子増倍管のレーザーレーダ信号に与える影響を解析している。長い時定数成分(約200 μ s)がある場合、鉛直方向のレーザーレーダの信号が実際の入射光よりも大きめに測定される。この特徴を衛星データに当てはめると強い入射光の後ろで信号が実際よりも大きめに測定されることになる。これは、実際のデータとは逆の傾向であるだけでなく、検知素子(半導体)の過渡応答に10msという非常に長い時定数を仮定するのも非現実的である。したがって、検知素子の過渡応答が原因とすることはできない。

前節で述べた走査方向による歪みの原因をMetlerらは¹⁰⁾は検知素子とAD変換器の間におこる交互作用(a-c coupling)が、信号の値を平均的なDNに向かって変化(decay)させるように働くためと考えた。平均化にはデータを取得していない時間も入るため、昼間では実際の信号よりも低い方向に、夜間では校正ランプの影響により高い方向に変化するという仮説である。しかし、この仮説は物理的な説明が不十分だけでなく、雲の両側に顕著にあらわれるというスキャンストライプを説明できない。これに対してFuscoら¹²⁾は、走査方向による歪みとスキャンストライプノイズを別々にモデル化した補正式を提案している。

Helderら¹³⁾は、検知素子からAD変換器に至るアナログ回路において10ms程度の時定数を持つ現象が起こることをシミュレーション等を通して確認した。さらに、このシステムの過渡応答特性を夜間のデータから推定し、スキャンストライプノイズの補正に適用した。

2.3 本論文で提案するモデル

Helderらは検知素子を含めたAD変換器全体を1つの線形システムと考えたが、ここでは、AD変換器の誤差としてOPアンプやコンパレータのオフセット電圧に起因するものを考えよう¹⁴⁾。オフセット電圧P(t)に以下のような過渡応答特性があると仮定するとスキャンストライプを含めた走査方向の違いによる誤差が線形システムの場合と同様に説明できる。

$$\frac{dP(t)}{dt} = \alpha \cdot X(t) - \beta \cdot P(t) \quad (1)$$

すなわち、あるレベル以上の入力信号が来た場合、オフセット電圧Pは増加するが、その影響は時定数間

β とともに減衰すると考える。オフセット電圧を考慮すれば、真の信号 x に対してみかけの信号が以下の式で与えられる。

$$X'(t) = X(t) - P(t) \quad (2)$$

したがって、みかけの信号 $X'(t)$ が得られた場合には、逆に $P(t)$ を足すことによって真の信号 X を得ることができることになる。

式(1)を利用したオフセット電圧 $P(t)$ の計算では真の信号 $X(t)$ をどう設定するかが問題となる。厳密には、畳み込む積分が必要であるが、オフセットの影響が真の信号にくらべて十分に小さい場合には、みかけの信号 $X'(t)$ （衛星のDN）で代用しても誤差は小さい。

3. ノイズの解析と補正

前節の最後に示した仮説に基づいてスキャンストライプノイズの解析および補正を検討する。式(1)で必要となるパラメータには入力ゲイン α と時定数 β がある。これらを推定するには、未補正のデータが必要で、夜間のデータが望ましい。なぜなら、補正後のデータでは、リサンプリングのためライン単位に走査方向や校正ランプの点灯状態を一意に定めることができない。また、昼間のデータでは、入力信号の影響を考える必要があり、問題が複雑になる。

本研究ではパラメータの推定には前述した論文¹⁰⁾のデータを用い、その結果を昼間のデータの補正に利用することとした。

3.1 夜間のデータの解析

ランドサットTMの走査ミラーが一往復に要する時間は142.195msecであり、データ取得には、後方走査と前方走査にそれぞれ60.743msecが使われる。サンプリング間隔は9.611 μ secであるから、各走査では約6320ピクセル分のデータとなる。実際には6120ピクセル分のデータが記録される。

データが取得されていない間（約1080ピクセル分）に校正ランプが点灯される。その時間は約60ピクセル分ある。また、校正ランプの状態と信号の強度DNをTable 1に示す。

以上の検討から夜間のデータでは、Fig.2に模式的

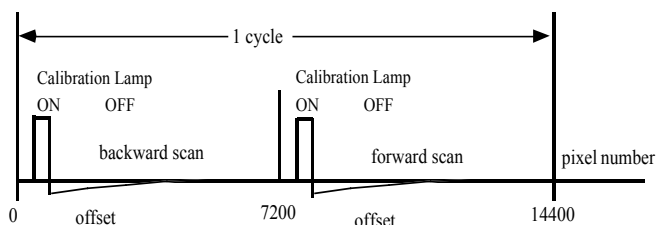


Fig.2 Schematic model of night time signal

Table 1 Lamp status and offset DN

Lamp Status	Signal Intensity	Offset Value
0 0 0	0	0.00
0 0 1	40	0.04
0 1 0	64	0.06
1 0 0	100	0.08
0 1 1	100	0.08
1 0 1	144	0.10
1 1 0	164	0.12
1 1 1	200	0.15

に示すような入力信号 X_i が想定できる。ここで、 i はピクセル番号であり、一つのサイクルが、14400ピクセル分の時間に対応する。

式(1)を離散化したオフセット電圧のモデルを以下に示す。

$$P_{i+1} - P_i = \alpha X_i - \beta P_i \quad (3)$$

入力がない場合には、以下のように単純化される。

$$P_{i+1} = (1 - \beta)P_i \quad (4)$$

時定数を1000ピクセルとすれば、 $(1 - \beta)$ は0.999となる。一方、入力が一定で、時間が短い場合には次の式が成り立つ。

$$P_{1080} = 60 \cdot \alpha \cdot X_i \quad (5)$$

α を求めるために、データ取得開始時点のオフセットをMetlerらの論文¹⁰⁾で示された夜間の信号増加の変化分とする。校正ランプの状態別に図から読み取った値を、Table 1の右端の欄に示した。式(5)から α は 1.25×10^{-5} と推定できる。定常状態におけるオフセットは式(3)より $\alpha X / \beta$ となる。 X が62DNでは0.78となり、文献9)に示されたデータの約半分となる。

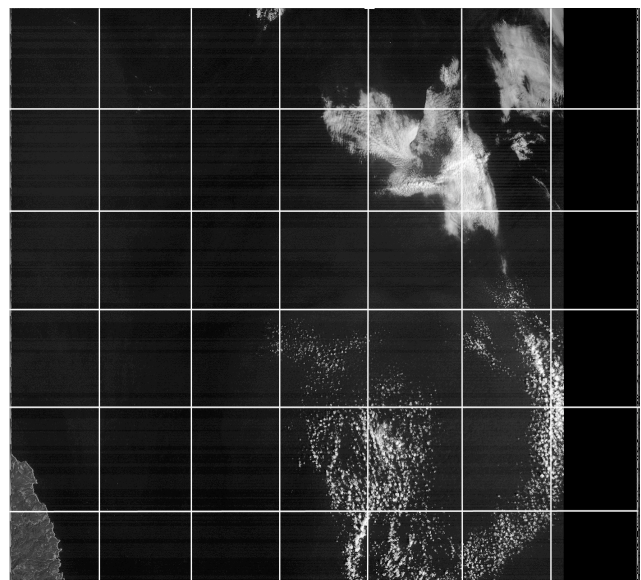


Fig.3 Uncorrected Landsat TM images over sea

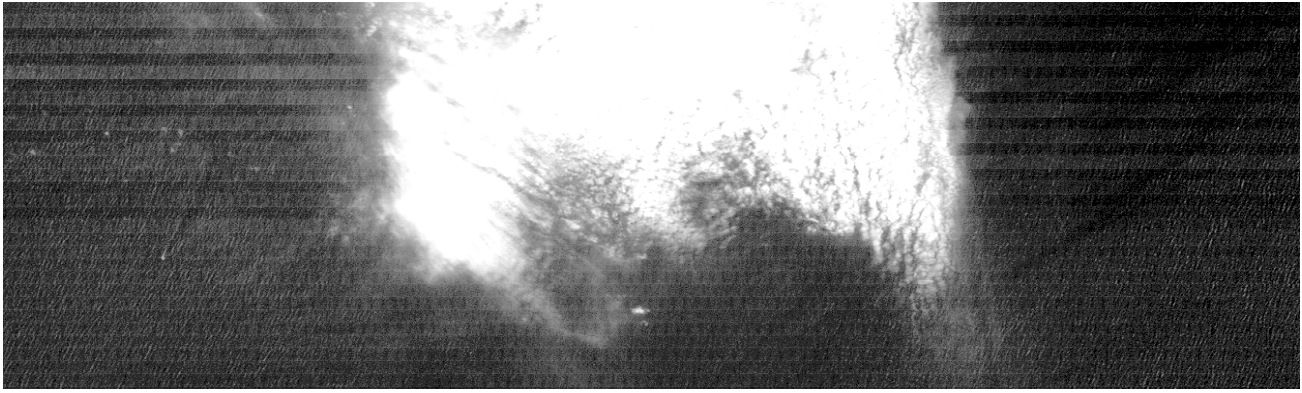


Fig. 4 Scanstripe noise observed in the uncorrected Landsat TM image

3.2 昼間のデータへの適用

本論文で補正の対象とする衛星画像は、1996年9月11日に撮影された未補正のランドサットTMデータ（パス106,ロウ32）である。バンド3の画像をFig.3に示した。左下に岩手県の一部が見える他は、すべて海である。北東に厚い雲がみられ、その周りでスキャンストライプが見られる。この部分を拡大し、スキャンストライプを強調して示したものが、Fig.4である。最初のスキャン（後方走査1）で、雲の西側の輝度が、次のスキャン（前方走査0）に比べて、輝度が落ちていることがわかる。この傾向は雲が薄くなるにつれて小さくなっている。

Fig.5にFig.4の上半分の部分の平均的なプロファイルを示した。DNが約100の雲の領域が500ピクセル分続いているが他の海に部分はかなり低い値を示している。Fig.6に雲の領域の前方走査と後方走査の差の平均的なプロファイルを示した。また、Fig.6には前節で同定したオフセット電圧を補正した場合のプロファイルも示した。補正後にはスキャンストライプの影響が軽減されていることがわかる。なお、パラメータ α および β は、前節での議論からそれぞれ 2.0×10^{-5} と0.001に設定した。

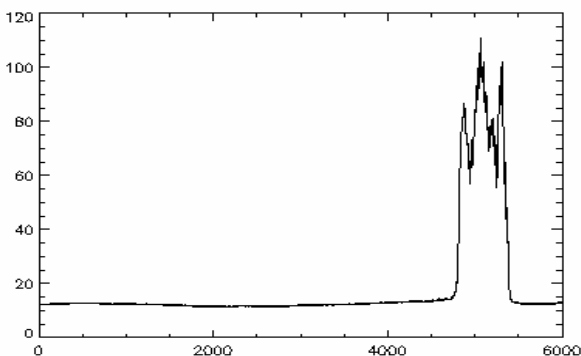


Fig. 5 Averaged horizontal profile of the satellite image

3.3 問題点

本論文では平均的なプロファイル（バンド3）に対する補正結果を示した。われわれの仮説が正しいとすれば、AD変換器は検知素子やバンドに依存しないため、この解析はすべてバンドや検知素子に適用できると考えられる。

また、補正の大きさが非常に小さいため、四捨五入などの整数化処理を行うと横縞（スキャンストライプ）が消える代わりに縦縞が出てくる恐れがある。したがって、衛星データを整数ではなく実数で取り扱うことが望ましいが、画像化する場合には誤差拡散などの手法が必要となる。

4. おわりに

TMのセンサーに起因する雑音については、ランドサット5号の打ち上げ直後に多くの論文で解析され、レベルシフトなど一部の問題に対しては有効な対策が示された^{15), 16)}。しかし、スキャンストライプノイズについては、対症的な方法が実施された例¹⁶⁾はあるが、本質的に有効な対策が示されない

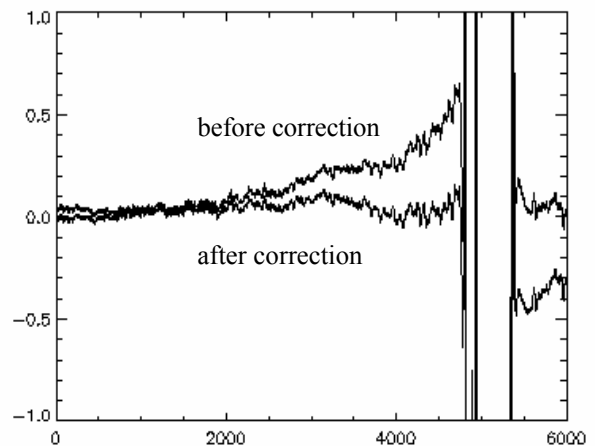


Fig. 6 Difference of forward and backward scan

まま、多くの研究プロジェクトが終了してしまっ
た。1986年以降、しばらくの間は、対症療法的な画
像処理^{17)、18)}ではなく、計測に係わる問題としてこ
の問題を解析した論文は発表されていなかったよう
である。

このような状況に対して、著者は独自に研究を進
めてきたが¹⁹⁾、最近のランドサットのセンサーに関
する特集記事²⁰⁾からHelderら¹³⁾の論文を知ること
ができた。本論文で提案する方法は、Helderの方法
をより簡便化したものであると思われる。

なお、センサーに起因する系統的なノイズの補正
は未補正のデータに適用する必要があるため、衛星
データの利用者ではなく、データの提供の段階で修
正されていることが望ましい。関係機関の検討を期
待したい。

5. 参考文献

- 1) 飯倉、横山 (1998) 衛星画像のラジオメトリック
な外乱に関する考察、日本リモートセンシング学
会第24回学術講演会論文集、pp.65-68
- 2) 飯倉、横山 (1998) 衛星画像の精密幾何変換の自
動化に関する考察、日本写真測量学会秋季学術講
演会論文集、pp.285-288
- 3) 飯倉 (1999) 衛星画像の実利用における大気・地
形効果補正の必要性とその課題、千葉大学環境リ
モートセンシング研究センター共同利用研究会報
告集、第4号、pp.19-23
- 4) 飯倉、横山 (1998) 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
- 5) 飯倉、横山 (1999) ランドサットTM画像の大
気および地形効果の補正、日本リモートセンシ
ング学会誌、Vol.19, No.1, pp.2-16
- 6) 飯倉、佐藤、横山 (1999) 熱バンドを用いた衛
星画像における薄い巻雲の影響の除去、日本リ
モートセンシング学会誌、Vol.19, No.1, pp.59-
63
- 7) 飯倉 (2002) 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
- 8) 宇宙開発事業団 (1986) 『地球観測データ利用ハ
ンドブック-ランドサット編・改訂版-』、リ
モートセンシング技術センター
- 9) W.A.Malila et al. (1984) Characterization of
LANDSAT-4 MSS and TM Digital Image Data,
IEEE Trans, Vol.GE-22, No3, pp.177-19
- 10) M.D.Metzler and W.A.Malila (1985)
Characterization and Comparison of Landsat-4
and Landsat-5 Thematic Mapper Data,
Photogrammetric Engineering and Remote
Sensing, Vol.51, No.9, pp.1315-1330
- 11) 飯倉、杉本、清水 (1987) 光電子増倍管に起因
するレーザーレーダ測定データの歪みの補正、計
測自動制御学会論文集、Vol.22, No.12,
pp.1324-1329
- 12) L.Fusco et al. (1986) Landsat TM image
forward/reverse scan banding : character-
ization and correction, Int. J. Remote
Sensing, Vol.7, No4, pp.557-575
- 13) D.Helder et al. (1997) Landsat TM memory
effect characterization and correction,
Canadian J. Remote Sensing, Vol.23, No4,
pp.299-308
- 14) 南茂夫編著 (1986) 科学計測のための波形データ
処理、CQ出版、pp.52-59
- 15) J.M.Murphy et al. (1984) Revised Radiometric
Calbration Technique for LANDSAT-4
Thematic Mapper Data, IEEE Trans, Vol.GE-
22, No3, pp.243-251
- 16) R.Burnstein et al. (1984) Analysis and
Processing of LANDSAT-4 Sensor Data Using
Advanced Image Processing Technique and
Technologies, IEEE Trans, Vol.GE-22, No3,
pp.192-221
- 17) R. Srinivasan, M. Cannon, and J.White (1988)
Landsat data destriping using power spectral
filtering, Oprical Engineering, Vol.27, No.11,
pp.939-943
- 18) D.Helder et al. (1992) A technique for the
reduction of banding in Landsat Thematic
Mapper images, Photogrammetric Engi-
neering & Remote Sensing, Vol.58, No10,
pp.1425-1431
- 19) 飯倉、佐藤 (1999) ランドサットTM画像にお
けるスキャンストライプノイズの解析、日本リ
モートセンシング学会第27回学術講演会論文集
、pp.7-10
- 20) D.Helder et al. (2004) Landsat Thematic
Mapper reflective-band radiative artifacts,
IEEE Trans, Vol.GE-42, No12, pp.2704-2716

謝辞

本研究で使用したランドサットTMデータは
EOSAT/宇宙開発事業団より研究用として提供され
たもので、所有権は米国政府にあります。