

LANDSAT画像の歪補正

上原勝徳 (富士通), 笹羽晴夫 (富士通)

1. はじめに

リモートセンシングデータの解析・利用を行なう上において、得られた情報の地図学的な位置を知ることは非常に大きな問題である。このために、リモートセンシングデータの解析・利用に先んじて、前処理としてデータの幾何学的な歪の補正を行ない地図的な位置を求めることが必要となる。さらにこの前処理済データを映像出力することにより、その後の解析・利用を容易に進めていくことが出来ると考える。我々はLANDSATの CCTデータを入力とし、幾何学的な歪の補正を行ない映像または CCTとして出力するソフトウェアを開発している。

2. 概要

(1) 歪補正ソフトウェアの必要性

リモートセンシングデータの解析・利用の前処理として実行される歪の補正の必要性を調べてみると以下に示す場合が考えられる。

- ・ R/S データから土地利用状況の判読図作成や R/S データをメッシュデータの基礎データとして利用する時などである。目的や縮尺によって投影法が異なるが地図学的な位置を正確に求めることが必要となる場合である。
- ・ スペクトルバンド間の演算・比較や経時変化を観察する場合に、異なるスペクトルバンドのデータ、異なる日時のデータ、画像の位置合せを行なう場合。
- ・ R/S データをそのまま映像化することにより地図の代用として使用する場合。
- ・ 既存の地図データと重ね合わせて利用する場合。
- ・ 画像をつなぎ合わせるモザイクングを行なう場合。

などがある。

(2) 歪の原因

画像の歪としては、衛星の運動による画像の歪と測定器と地球の運動の影響による画像の歪などがある。衛星の運動によるものは、衛星の高度変化、姿勢変化、速度変化により画像の歪となる。

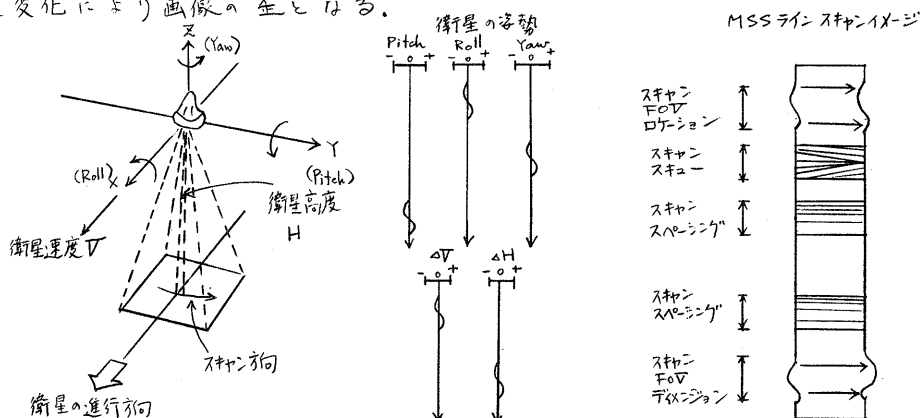


図 2.1 衛星の運動による画像の歪

測定器と地球の運動の影響による画像の歪としては、次の三つが考えられる。
 まず、スキャン中の地球の回転による影響がある。これは衛星がスキャンを行っている
 しながら進行しているがこの間に地球が回転していることにより下図に示す様に
 θ だけズレて地表面をスキャンしている。



図 2.2 地球の回転による影響

次に、スキャン中の衛星の運動と地球の曲率による影響がある。(地球の回転を無視)

最後に、ミラーのスキャン速度の非直線性
 (スキャン角速度一定) による影響がある。



図 2.4 スキャン速度の非直線性

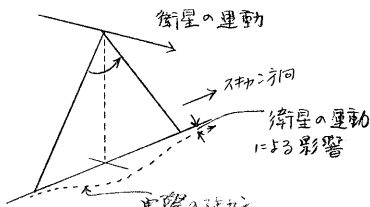


図 2.3 一定のスキャン角速度と地球の曲率の影響

(3) 歪補正の方式

いろいろな方法が考えられるが、ここでは前方交会方式、後方交会方式、両者を考慮した観測モデル方式(仮称)について述べる。前方交会方式では、多項式により入力画像及び出力画像の特徴点の対応づけを行ない出力画像を作成する。

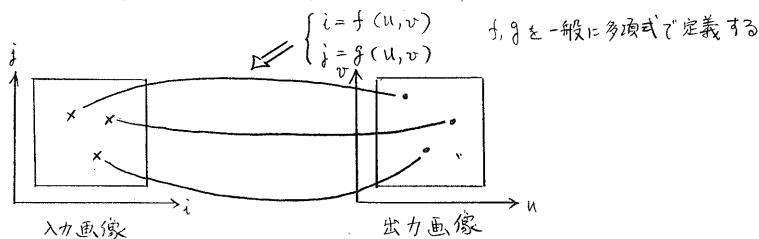


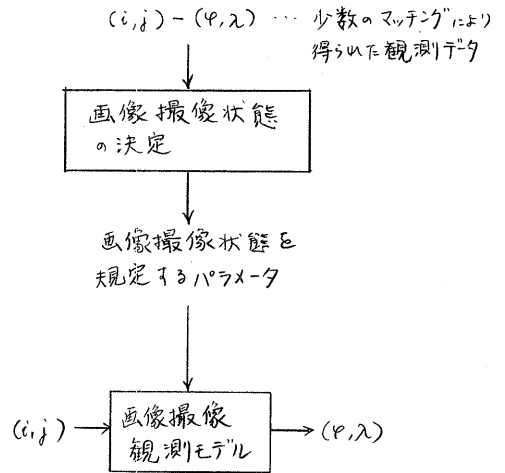
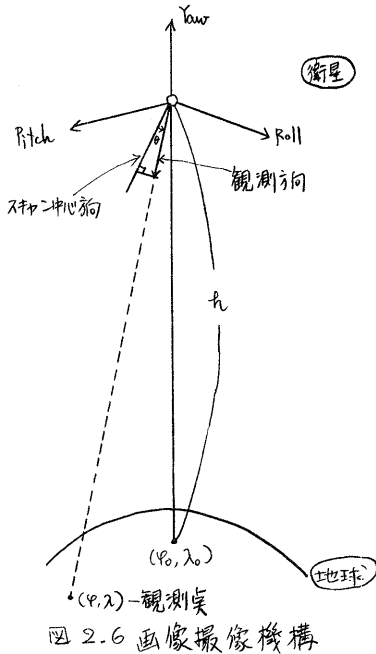
図 2.5 多項式によるモデル化

例えば、5次の多項式で定義した場合、は、次の様に11係数を決定するのに21個の対応点が必要である。

$$\begin{cases}
 i = a_1 u^5 + a_2 u^4 v + a_3 u^4 + a_4 u^3 v^2 + a_5 u^3 v + a_6 u^3 \\
 \quad + a_7 u^2 v^3 + a_8 u^2 v^2 + a_9 u^2 v + a_{10} u^2 + a_{11} u v^4 + a_{12} u v^3 \\
 \quad + a_{13} u v^2 + a_{14} u v + a_{15} u + a_{16} v^5 + a_{17} v^4 + a_{18} v^3 \\
 \quad + a_{19} v^2 + a_{20} v + a_{21} \\
 j = b_1 u^5 + b_2 u^4 v + b_3 u^4 + b_4 u^3 v^2 + b_5 u^3 v + b_6 u^3 \\
 \quad + b_7 u^2 v^3 + b_8 u^2 v^2 + b_9 u^2 v + b_{10} u^2 + b_{11} u v^4 + b_{12} u v^3 \\
 \quad + b_{13} u v^2 + b_{14} u v + b_{15} u + b_{16} v^5 + b_{17} v^4 + b_{18} v^3 \\
 \quad + b_{19} v^2 + b_{20} v + b_{21}
 \end{cases}$$

次に、後方交会方式では、画像の撮像機構をモデル化し、入力画像から直接出力画像を作成する。

観測モデル方式では、画像の撮像機構をモデル化し、さらに入力画像から画像の撮像状況を推定し、その結果を利用して出力画像を作成する。画像撮像観測モデルは、画像撮像時の衛星の姿勢、高度、速度、直下点の緯度/経度、およびスキヤナのデータの展開角、スキヤン角度等により構成されている。このモデルから、ある撮像時刻におけるサンプリング絵素 (i, j) に対応している地表面の緯度/経度 (φ, λ) が決定される。決定された $(i, j) - (\varphi, \lambda)$ から歪補正を行なう。



歪補正の方式を比較してみると、前方交会方式では、画像撮像方式にディペンデントしない方式でモデル化が簡単でプログラミングが単純である。しかし実行においては多数のグランドコントロールポイント (GCP) を必要とする。一方、後方交会方式は、画像撮像方式にディペンデントする方式であり、モデルが複雑でプログラミング化が困難であり、さらに誤差が大きい。観測モデル方式では、後方交会方式と同様にプログラミング化は困難であるが、少数の GCP で精度よく処理を実行することが出来る。

ここで、観測モデル方式における処理の概要を述べる。詳細については、後述する。

① GCP マッチング及び衛星の姿勢の推定

撮像された画像データ及び正確な位置のわかっている GCP データの両者のマッチング結果データを利用して、画像撮像時の姿勢を推定する。次に、推定された姿勢をもとに入力画像データの正確な地図学的な位置を求める。

② 入力画像及び出力画像の対応づけ (歪補正係数の計算)

決定された地図学的な位置と出力画像は投影変換により対応づけられるので、①の結果と組合せて入力画像と出力画像の対応づけが行なわれる。

③ 出力画像の再構成 (リサンプリング)

対応づけ結果を利用して画像データのリサンプリングを行なう。

以上の処理を行なうことにより、正確な地図学的位置のわかった前処理者のデ

ータを作成することが可能となる。

(4)歪補正ソフトウェアの構成と処理の流れ

歪補正と投影変換処理を行なうこのソフトウェアは、機能的な面を考慮して、次の8個のプログラムから構成されている。

①画像入力プログラム

CC Tに格納されているLANDSAT画像データをフォーマット変換して大記憶に転送する。

②GCP作成プログラム

5万分の1の地図等からGCPモデルを作成し、画像入力装置を利用して量子化する。このデータを衛星がノミナルな姿勢・軌道であると仮定して画像の投影変換を行ないGCPライブラリを作成する。

③GCPマッチングプログラム

大記憶の画像データとGCPライブラリを使用してGCPマッチングを行ない入力画像データ上の位置とGCPのもつ緯度経度の対応づけをとる。

④三軸姿勢のカーブフィッティングプログラム

注釈データのうち姿勢データに対してカーブフィッティングを行ない姿勢を定義する多項式の係数を決定する。

⑤三軸姿勢決定プログラム

GCPマッチングより得られた観測データと、注釈データのうちの軌道データを入力し、三軸の姿勢を定義する多項式の係数を精度よく決定する。次に格子点について入力画像上の画素と対応する地球上の位置と画像撮像時の観測モデルから求める。

⑥歪補正係数の計算プログラム

出力画像における画素と地球上の位置とUTM等の投影変換で対応づける。すでに求められている入力画像上の画素と地球上の位置との関係より、出力画像上の画素から入力画像上の画素を求める関係式を算出する。

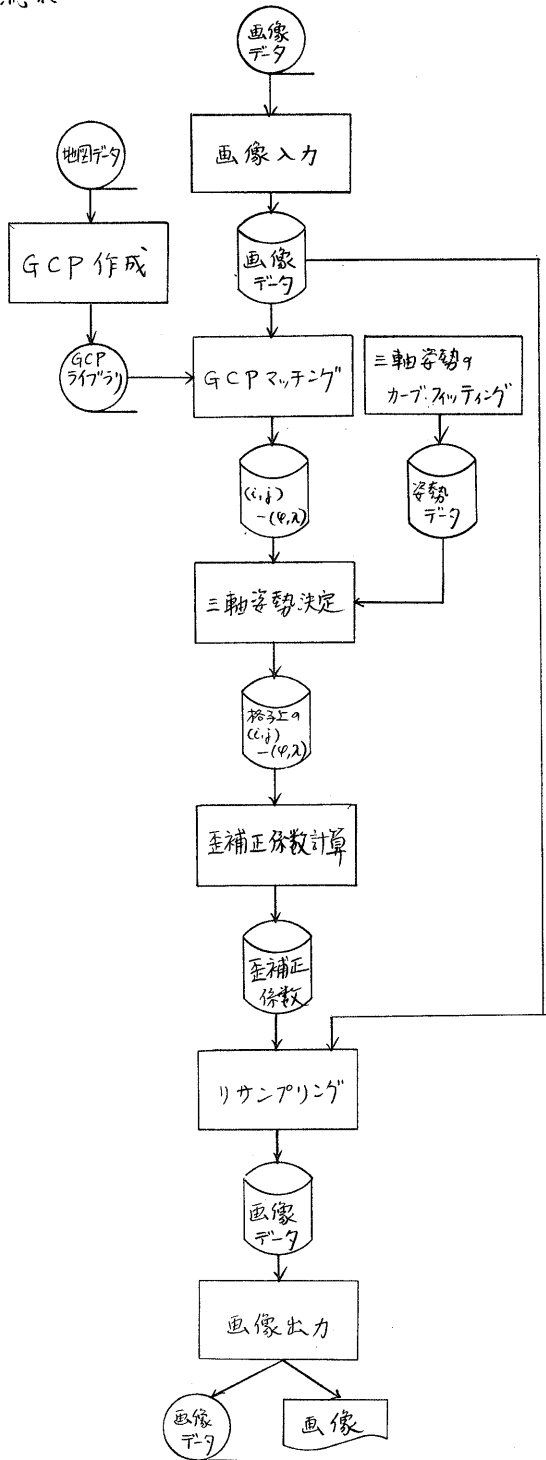


図2.8 歪補正ソフトウェアの処理の流れ

⑦ 画像データのリサンプリングプログラム

入力画像と出力画像の対応関係式を使用して、画像データのリサンプリングを行なう。この場合、出力画像を矩形のブロックに分割し、ブロックの頂点は関係式でリサンプリングし、ブロックの内部は線形補間により、リサンプリングを行なう。

⑧ 画像出力プログラム

大記憶内の画像データを視覚にうつたえるために、画像イメージでラインプリンタ及び磁気テープに出力する。磁気テープからは、画像出力装置を利用することにより、フィルム化することが出来る。

3. データの準備

歪補正および投影変換処理が行なわれるデータは、LANDSATが撮像した映像で、4巻のCCDの各巻に画像が下んぞく状に分割されて格納されているものである。この4巻から画像を再構成し、大記憶に直接編成ファイルとして格納する。このデータは、GCPマッチングにおけるサーチエリア、およびリサンプリングの入力データとして使用される。データ量は1画面が3240×2340画素で1画素は8ビットから構成されている。

次に、テンプレートデータの作成であるが、このテンプレートを作成する方法としては、地図からテンプレートを作成する方法および実際のリモートセンシングデータからテンプレートを作成する方法の2通りが考えられる。ここでは、前者の方法に重点をおいて述べることにする。

・地図からテンプレートを作成する方法

地図はテンプレートの材料の1つとして有用なものである。5万分の1の地図は、ユニバーサル横メルカトル図法で書かれ歪はほとんどないので、マッチング用テンプレートとして適当であると考えられる。一方、LANDSATから撮像したデジタル画像は、軌道の子午線に対する若干の傾き、また撮像中の地球の回転により歪んでいるので、5万分の1の地図をそのままテンプレートの材料として使用することは出来ない。しかし、ここで地図画像をLANDSAT画像に変換し、テンプレート画像とすることが出来る。

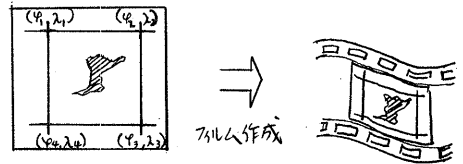
次に、5万分の1の地図からテンプレート画像を作成するまでの概略手順を示す。

① 5万分の1の地図のコントラスト化

5万分の1の地図の中でGCPとして適当な領域にコントラストをつける。

② コントラスト化された地図を撮影してフィルムを作成

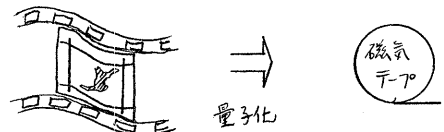
4すみに、正確な緯度経度を記入しておく。



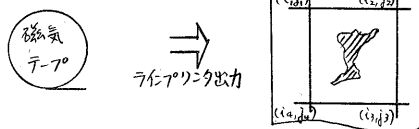
③ フィルムを画像入力装置により

デジタル化

後に画像変換を行なうために想定しているテンプレート画面より大きい目に、細かい精度で量子化を行なう。

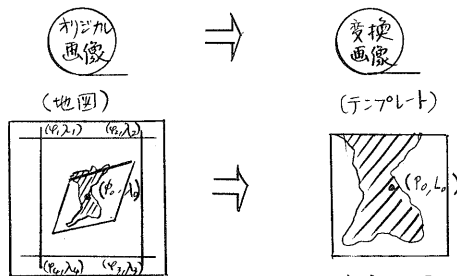


④ 磁気テープに記録された画像データの出力
 画像を出力することにより、
 (φ, λ) と (i, j) の対応をとる。



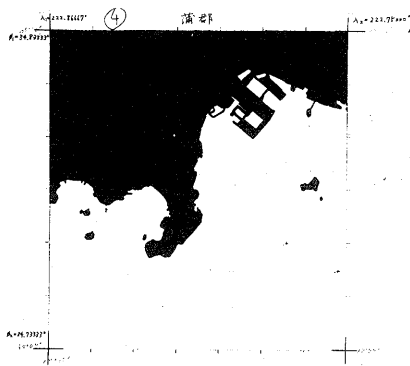
⑤ テンプレートの作成

③において作成された画像に位置変換を行ない、衛星が撮像した分の画像を作成し、マッチングに適したテンプレートとする。



(φ, λ) と (φ_0, λ_0) を対応づける

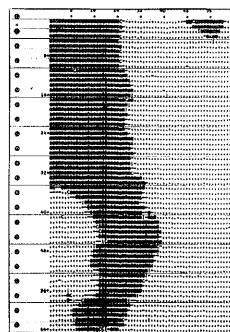
図3.1 テンプレートの作成方法



(1) 地図



(2) 地図のライブラリ出力



(3) 作成されたテンプレート

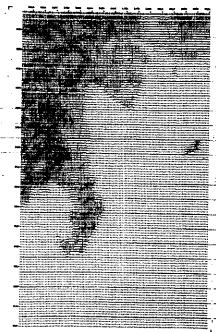
図3.2 実際のテンプレートの作成

・ 実際のR/Sデータからテンプレートを作成する方法
 衛星が打上げられた後で収集された実際のR/Sデータの中からGCPとして有用なデータを抽出し、適当な大きさに整形してテンプレートデータとする。
 この場合の長所は、実際のデータであるためにマッチングの精度の向上が望める。しかし一方衛星を打上げるまでシステムのテスト評価が出来ない。GCPの正確な緯度経度を求めることが困難である等の問題も多い。

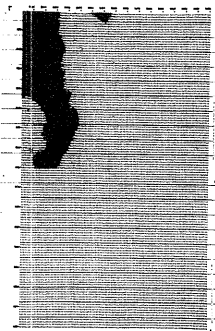
4. GCPマッチング

テンプレートマッチングを行なう方法は、相互相関法、SSDA法、バイナリマッチング法など各種の手法が紹介されている。我々は種々の実験から、その処理時間、信頼性等を考慮して、相互相関法を採用している。

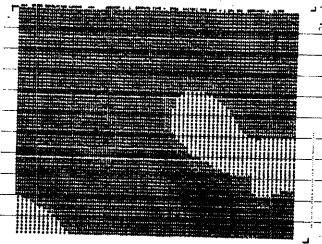
手法	比較項目	処理時間	精度	信頼性
相互相関法		1	非常に良い	解が安定して求まる。
SSDA法		0.1 ~ 1	データの性質に 依存する。	解及び処理時間が データの性質に依存する。
バイナリ マッチング法		1	データの性質に 依存する。	閾値の設定により 解が異なる。



(1) サテリアデータ



(2) テンプレートデータ



(3) 処理結果相関データ

図 4.1 GCP マッチング 処理結果例

5. 三軸姿勢推定

ここで行なう三軸姿勢の推定は、ロール・ピッチ・ヨーの三軸の姿勢のノミナル値からのズレを多項式で近似した時の係数を推定することである。姿勢のノミナル値を衛星の軌道面に対して右図の様に設定する。

右図に示す位置に衛星の姿勢がある場合を、姿勢のズレがゼロとする。一般には、衛星の運動に従っての動きにより、実際の姿勢軸はノミナル値からズレており、画像に歪を与える原因となる。この時間間数となるズレを画像データを利用して逆に推定することになる。

実際のプロセスは図 5.2 に示す流れになる。与えられた (i, j) から (φ, λ) を計算する機構は一般に観測モデルと呼ばれる。我々は観測モデルとしては TRW の論文から引用した。

また推定法としてはベイジアン重みつき最小自乗法を採用し、具体的な解法はニュートンラフソン法による。

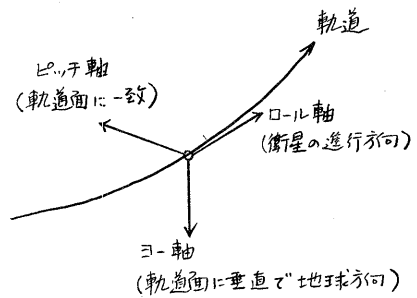


図 5.1 人工衛星の三軸

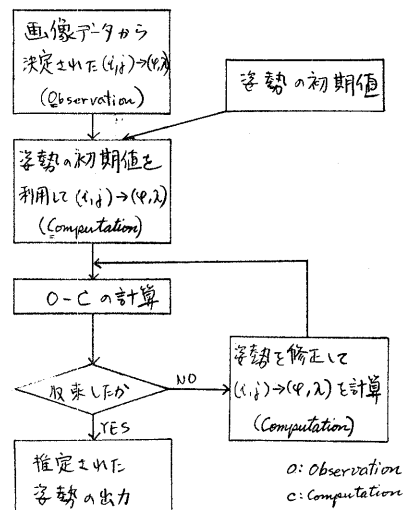


図 5.2 姿勢推定のプロセス

6. 歪補正係数の計算

映像出力する場合には、利用価値の面から考えて、各種の映像変換した映像が望まれる。LANDSATが得た映像(入力画像)から投影変換した映像(出力画像)を得るために、入力画像の画素 (i, j) と出力画像の画素 (φ, λ) の対応づけを行なう。入力画像と測地座標系 (φ, λ) は、すでに観測モデルにより対応づけが行なわれているので、ここでは、まず測地座標系と出力画面の対応づけを行ない、出力画像

と入力画像の対応づけを行なう。測地座標系から出力画像への変換は、一般の投影変換の方法が採用される。それは、UTM投影変換、メルカトル投影変換、球面多面体投影変換等である。

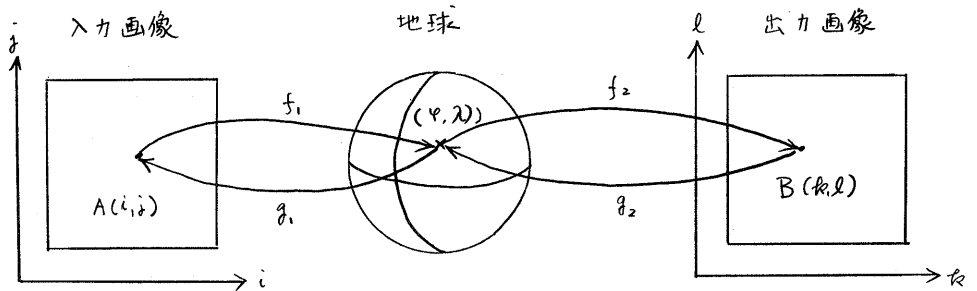


図 6.1 入力画像と出力画像の対応づけ

出力画像をコア上の二次元配列とする。これを地図上のある投影座標上の格子に関係づけ、さらにこの格子の測地学的緯度・経度を計算出来る。これは地図の投影法から導くことが出来る。一方姿勢推定等の結果、撮像系のパラメータが決定されれば、入力画像の二次元配列の各要素 (i, j) の緯度・経度 (ϕ, λ) は計算可能である。以上の情報をもとに、出力画像の二次元配列の各要素 (k, l) が入力画像のどの要素に対応するかを計算する。この対応関係を上図のように f_1, f_2, g_1, g_2 とする。また (ϕ, λ) を媒体とした f_1 と f_2 の合成を f 、 g_1 と g_2 の合成を g とする。

f はスキャンの際の視線ベクトルから計算出来るが、 g は LANDSAT 等の移動衛星では、直接的に精度よく求めるのは困難である。又、この f や g も一実ごとに計算すると処理時間が膨大になるため、画像を比較的大きな格子に分割し、この格子点について f や g を正確に計算して、4個の格子にかこまれた区域（これを擬似レゾリューション）内の点は、4点を用いた補間で写像する。この補間式の係数を歪係数と呼ぶことにする。例えば f の歪係数は、

$$\begin{cases} k = a_1 + b_1 i + c_1 j + d_1 ij \\ l = a_2 + b_2 i + c_2 j + d_2 ij \end{cases}$$

の係数 $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$ である。

f の歪係数が既知であるとして g の歪係数を求めることを考える。

まず、A の擬似レゾリューション分割と同じ分割を B に対して行なう。

B の格子点が A の擬似レゾリューション内の

の点に対応するかがわかれば良い。

これがわかれば、 f の歪係数の逆変換から B の格子点の A への写像点

が求まり、それを用いて $g(A \rightarrow B)$ の歪係数を計算する。

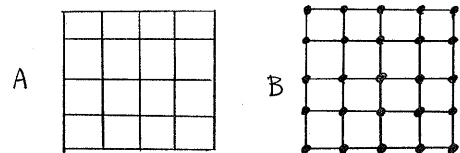


図 6.2 擬似レゾリューション分割

7. リサンプリング

実際の入力画像から出力画像へのデータの転送は、このリサンプリングで行なわれる。リサンプリングの方法としては、TRW が提案している最近接内挿法、線一次内挿法、TRW Cubic Convolution の 3 種類があるが、ここでは処理時間を重視し、最近接内挿法を採用した。

実際には 3240×2340 画素の LANDSAT 画像に対してリサンプリングを行なうには、大記憶と主記憶との間のデータ転送を有効に行なう必要がある。このために画像のデータ構造において考慮をほらった。それは、作業領域としてブロックデータ構造をとったことである。ブロックデータ構造とは、画像データを $n \times m$ の格子で分割し、その1つをブロックと呼び、これを主記憶と大記憶間のデータ転送の単位とするデータ構造をいう。これにより、大容量の画像に対してもリサンプリング処理を行なうことが出来た。

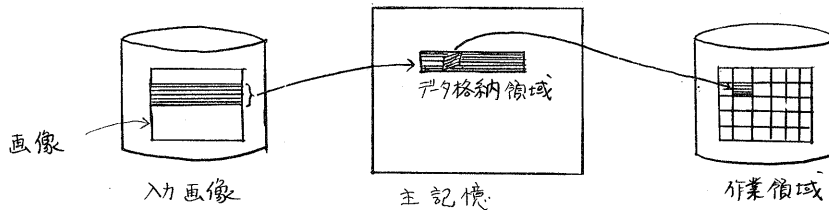


図 7.1 ブロックデータ構造によるリサンプリング

8. まとめ

この歪補正ソフトウェアを利用することにより、大量画像データの処理が可能である。また安定な解が求まる方式の採用により信頼性の向上とけかっている。さらに、プログラムを分割したモジュール方式を採用しているため、他の処理方式への変更も容易であると考えられる。

今後は、このソフトウェアを利用して、各種の応用、利用を考えていく予定である。

参考文献

- 1) "Ground Systems for Receiving, Analyzing and Disseminating Earth Resources Satellite Data" International Astronautical Federation, Nov. 1974
- 2) "Evaluation of Digital Correction Techniques for ERTS Images" S.S. Rifman, D.M. McKinnon, Final Report for NASA GSFC, July 1974
- 3) "All-Digital Precision Processing of ERTS Images" Ralph Bernstein, N75-20789, April 1975
- 4) "Attitude Time-Series Estimators for Rectification of Spaceborne Imagery" R.H. Caron, K.W. Simon (TRW), Journal of Spacecraft Vol.12, No.1 Jan. 1975