

全デジタル方式による高精度地球観測画像情報処理技術

High Precision All Digital LANDSAT Image Data Processing Techniques

地球観測衛星「ランドサット」は、地球資源の有効利用、地球環境モニタなどに必要なデータ取得のための人工衛星である。この衛星には、MSS(多重スペクトル放射計)とRBV(リターンビームビジコン)カメラが搭載されている。

人工衛星データには、衛星位置、姿勢などの推定誤差やセンサの作動状況の不確定性などのために、不可避免的に位置誤差、センサの感度むらによる誤差などが入ってくる。これらの誤差を最小にするための研究が世界中で行なわれている。宇宙開発事業団と日立製作所は、上記の誤差を最小にする全デジタル処理方法を開発した。本論文では、MSSに関するものの概要について述べる。

土屋 清* Kiyoshi Tsuchiya
坪井 晃** Akira Tsuboi
古村文伸** Fuminobu Komura
久保 裕*** Yutaka Kubo
山縣振武*** Shinbu Yamagata

1 緒 言

現在、人工衛星を利用したリモートセンシングの分野で最も組織的に世界的規模で利用されているものとしては、「ランドサット」データがある。「ランドサット」データの用途としては、地球全域にわたる地表面の資源(鉱物、農作物、水など)、地形、環境汚染などの観測があり、いずれも高精度なデータの要求が強い。しかし、データには観測中に様々なひずみが混入するため¹⁾、ひずみの補正が必要である。ひずみは「ランドサット」自体の姿勢やそれに搭載されているセンサの特性に起因しているため、もし、これらが正確に分かれれば、ひずみの完全な補正も可能である。しかし、現状では入手できる情報には未知の誤差が含まれているため、ひずみの補正は、刻々変化する衛星の姿勢やセンサの特性を推定する技術に依存しなければならない。

ところで、185km四方の領域をカバーする1シーンのデータは、 10^7 個以上のデータポイントから成っている。これを1枚の画像として表示する場合は、一点一点にMSS(Multi-Spectral Scanner: 多重スペクトル放射計)のとらえた太陽反射光の強さに対応する濃度を与える。この個々の点を画素と呼んでいる。実際のデータ処理の場合、処理した結果は磁気テープに出力し、このテープから画像を作る。利用者はテープを使う者もいるし、画像を使う者もいる。以下の説明では、話を分かりやすくするために「画像」という言葉を使い、観測値を濃度という言葉で表現する。ひずみの補正は、これらのすべての画素を対象としている。ひずみ補正については、既に膨大な数の論文が発表されていて、それら全部の引用は不可能に近い。この論文では参考にした論文のうち日本文の1編だけ²⁾を参考文献の箇所に掲げておく。宇宙開発事業団と日立製作所は、衛星からの観測画像情報をすべてデジタル的に処理することにより、各種のひずみを補正する一方式を開発した。

この方式では、あらかじめ衛星の姿勢やセンサ特性などのひずみ発生の機構をモデル化しておく。このモデルを衛星モデルと呼ぶことにする。このモデルは、処理時間の許す範囲内で必要な精度を与えるものとしておく。観測画像情報のひずみを補正するときにセンサ感度の不均一性に起因する画像

の濃度に関するひずみを補正したのち、このモデルを用いて画像の形状や位置に関するひずみを補正する。このとき、ひずみの発生機構の変化に対しては、カルマンフィルタにより衛星モデルのパラメータを更新し、ひずみ補正の誤差の増大を防止することもできる。

以下では、「ランドサット」に搭載されているセンサとしてMSSを用いる場合に限定して、画像ひずみの補正方式について述べる。

2 「ランドサット」による地表の観測と観測画像のひずみ

「ランドサット」のMSSは、走査鏡の振動を利用して地表を185km幅で走査し、地表からの太陽反射光を四つの波長帯(バンド)に分けて取り込む。取り込まれた光の強さは検出器により電気信号に変換されたのち、サンプリングされて6ビット情報(画像では画素の濃度に対応)に変換され画素となる。画素は、地表での80m四方に対応する。1回の走査で1個の検出器が収集する画素の連なりは、ラインと呼ばれる。このようにして収集された観測画像には、次の2種類のひずみが含まれている。

- (1) 放射計ひずみ
- (2) 幾何学的ひずみ

放射計ひずみは、検出器の感度のばらつきや変動によって画素の濃度に生ずる誤差である。MSSは、各バンドごとに6個の検出器を用いて1回の走査で6ライン分の画像データを収集するので、このひずみは観測画像に6ライン周期の横じまとして現われる。

幾何学的ひずみは、観測画像の各画像の、基準画像(地図)からの位置ずれ量であり、表1¹⁾に示す要因から生ずる。このひずみは、観測画像に画像の変形、回転、移動として現われる。幾何学ひずみの大きさは、岬の先端や空港滑走路の交差点などの、地形に特徴があり、地球上の絶対位置が分かっている地点、いわゆるGCP(Ground Control Point: 地上基準点)から測定できる。

我が国のように、土地の細分化と利用の多様化が高度に進んだ地域で衛星画像を利用する場合には、観測画像の幾何学

* 宇宙開発事業団 理学博士 ** 日立製作所システム開発研究所 *** 日立製作所大みか工場

的ひずみを1画素(約80m)以下までに補正しておくことが望まれる。観測画像を同じ地域の過去にとった画像と比較して変化を調べる際には、特に高精度の補正が必要になる。

3 画像ひずみ補正処理の方式

画像ひずみ補正は、(1)観測画像の入力、(2)ひずみをもった観測画像の各画素を正しい濃度、正しい位置に置き換えるための放射計ひずみ補正関数及び幾何学的ひずみ補正関数を求めるひずみ計算処理、(3)この補正関数を用いて補正画像を製作するひずみ補正・出力から成る。

幾何学的ひずみ計算の方法として、多項式ひずみモデル方式がある。これは観測画像上の幾何学的ひずみの分布を多項式で近似するものである。多項式の係数はGCPで実測した幾何学的ひずみから決定される。この方式では、補正精度を高めるためには1シーン中に多くのGCPが必要となる。

これに対し、開発した衛星モデル方式は、衛星の姿勢やセンサの特性に起因するひずみ発生機構を解明し、これを精

密にモデル化してひずみ量を求めるものである。本方式はGCPを用いなくても幾何学的ひずみを補正できるという特長をもっている。

4 衛星モデルを用いた画像ひずみ補正方式

衛星モデルを用いた画像幾何学的ひずみ補正処理フローは図1に示すように、入力・放射計ひずみ計算、幾何学的ひずみ計算及びひずみ補正・出力の3ステップから成る。

第1ステップでは、NASA(National Aeronautics and Space Administration:アメリカ航空宇宙局)から2日に1度送られてくる軌道に関する情報を用いてVinti軌道計算法³⁾により衛星の位置を推定する。次に飛行中の衛星から送られてくる姿勢データを姿勢推定モデルに入力し、衛星の姿勢角を推定する。

衛星から送られてくる6ビットの観測画像情報は、この情報と一緒に送られてくる校正用標準光源の値(MSSはこの光源も観測する。)から作った変換テーブルを参照してまず7ビッ

表1 MSSにおける幾何学的ひずみの主な要因 MSSは、走査形のセンサであるため、1シーンを撮像し終わるのに30秒近くかかる。このため、観測画像は、衛星の軌道・姿勢のふらつきのほか、地球の自転などの影響を強く受ける。

誤差要因		内容	地表誤差(km)	誤差要因		内容	地表誤差(km)
衛星に起因する誤差	衛星軌道誤差	軌道直角方向 	37	衛星誤差	走査時間中の衛星飛行 	0.216	
		軌道方向 	30	センサ内部誤差	バンド間オフセット 	0.112	
		高度方向 	1.5		走査鏡振動の非線形性 	0.395	
衛星姿勢誤差	ロール		12	外部誤差	地球の自転(緯度に依存) 	4.5 (関東シーン)	
	ピッチ		12	視差	走査 平面地表 	0.115	
	ヨ一		2.5				

注:略語説明 MSS(Multi Spectral Scanner)

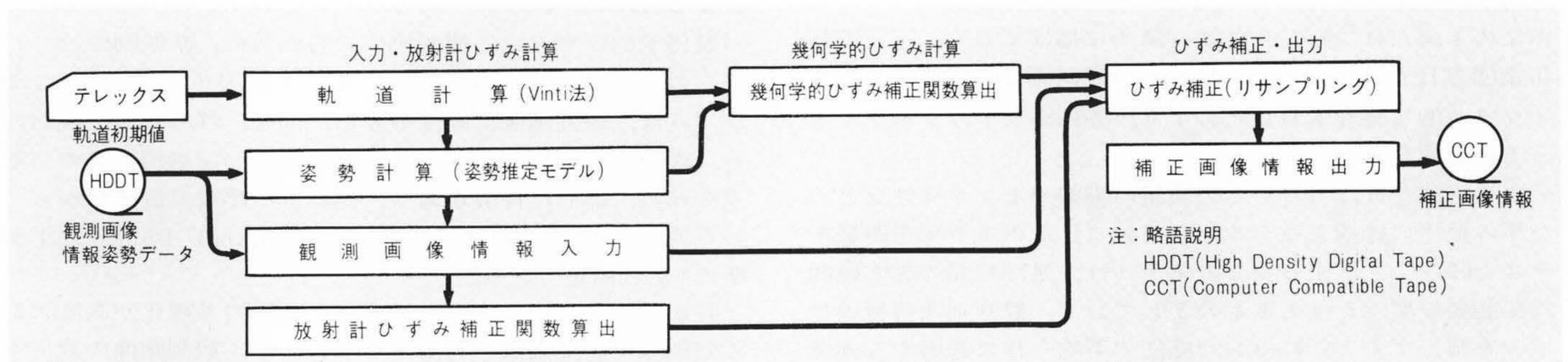


図1 衛星モデルを用いた画像ひずみ補正処理フロー 幾何学的ひずみ計算では、軌道計算結果と姿勢計算結果を用いて衛星モデルを決める。幾何学的ひずみの補正量を与える幾何学的ひずみ補正関数は、衛星モデルで表現される。

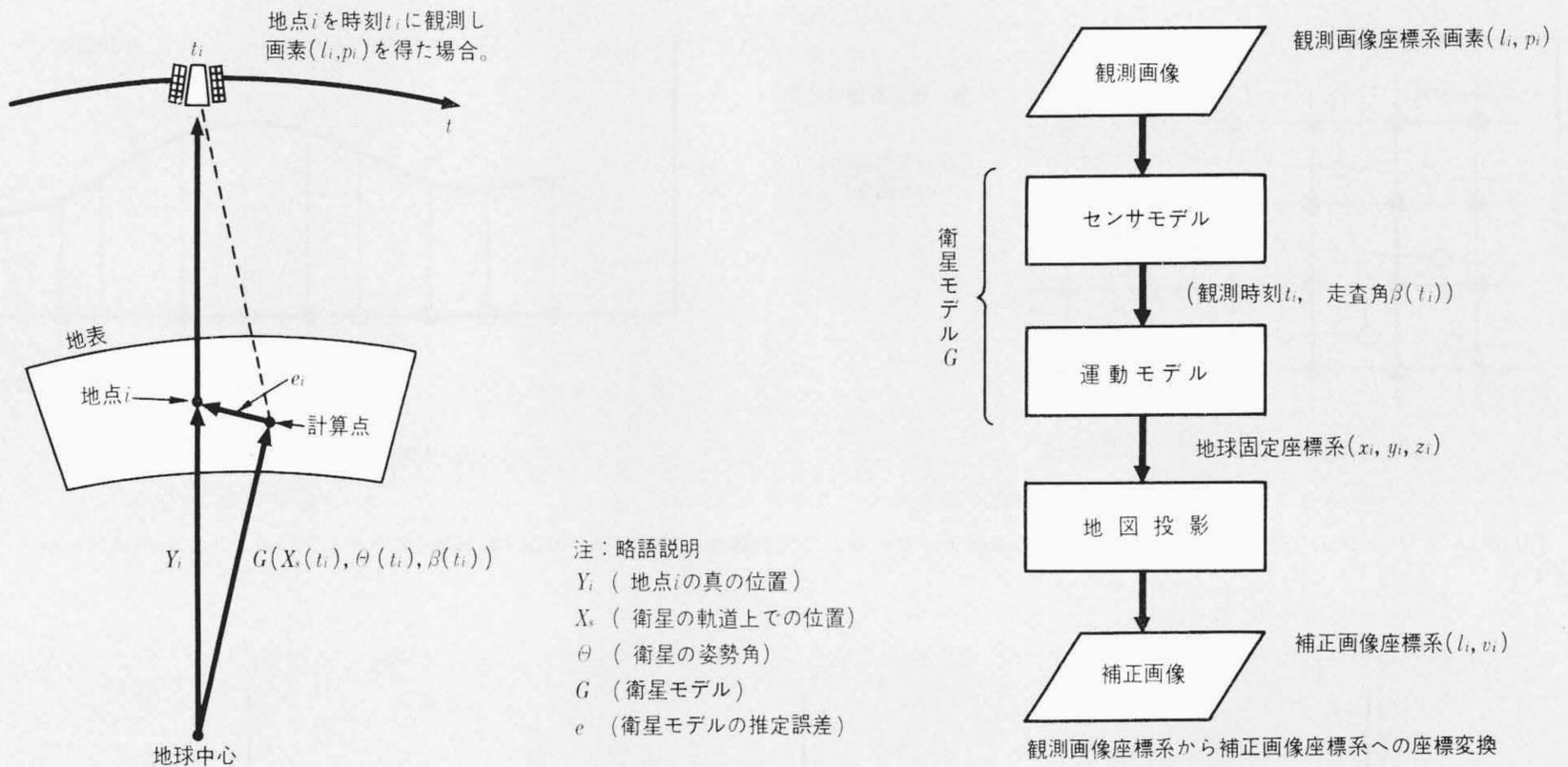


図2 幾何学的ひずみ補正に用いる衛星モデルと座標変換 観測画像の任意の画素の地表上の位置は、衛星モデルGにより計算される。しかし、衛星の軌道や姿勢の推定誤差などのため、計算点は真値からeだけ外れる。

ト情報にする。次に、1バンド中の6個の検出器の感度むらの影響を除くため、6個の検出器が受ける入射光の統計的性質は互いに等しいと仮定し、観測画像の1シーン全体を検出器別に統計処理し、各検出器の濃度の平均値と分散を求め、これを全検出器について一致させるよう補正関数を修正する。第2ステップでは、次節で述べるように衛星の軌道と姿勢角から幾何学的ひずみ補正関数を決める。この関数は、衛星モデルを用いて表現される。

第3ステップでは、放射計ひずみ補正関数と幾何学的ひずみ補正関数を用いて観測画像のひずみを補正し、補正画像情報をCCT(画像情報入り計算機用磁気テープ)に出力する。

4.1 衛星モデル

衛星モデルは、観測画像上の画素の位置(観測画像座標系:画像の縦方向 l , 横方向 p)を地球上の位置(地球固定座標系: x, y, z)に変換する関数である。この関数で得た地球上の位置は、地図投影法を用いることにより、補正画像上の位置(補正画像座標系:画像の縦方向 v , 横方向 u)に変換される。この二つの変換の連なりを幾何学的ひずみ補正関数といい、これを図2に示す。

まず画素の位置(l, p)からその画素の観測時刻 t とそのときの衛星に対するMSSセンサ走査鏡のなす角(走査角) β を求める。このとき、走査鏡振動の非線形性と不規則性を考慮する。時刻 t での衛星の位置と姿勢角は推定済みであるから、その時刻に走査鏡が向いていた地表上の位置 X が求まる。ここで衛星の軌道上での位置 X_s :(緯度 λ , 経度 ϕ , 高度 h)及び姿勢角 θ :(ロール θ_r , ピッチ θ_p , ヨー θ_y)を、時間変化を考慮して、時間の三次多項式で近似する。以上の結果、衛星モデル G は次式のようにになる。

$$X = G(X_s(t), \theta(t), \beta(t)) \dots \dots \dots (1)$$

このモデルから得られるひずみ補正関数を用いる補正をバルク補正という。これは、GCPを使わないので、夜間観測画像の補正にも適用でき、本方式の大きな特徴である。バルク補正後の補正画像に残る幾何学的ひずみは、約1kmである。

4.2 衛星モデルの精密推定法

補正画像中の幾何学的ひずみを減らすためには、衛星モデルの推定の精度を高めればよい。

ここでは、補正画像に幾何学的ひずみが残る原因は、 X_s と θ の推定誤差にあると考えて、補正画像上の幾何学的ひずみが最小となる X_s, θ の最適解をGCPを用いて求めることにする。これを式で表わすと(2)式のようにになる。

$$X_s, \theta : J = \sum_{i=1}^N \{Y_i - G(X_s(t_i), \theta(t_i), \beta(t_i))\}^2 \rightarrow \min \dots \dots (2)$$

ここに N : 用いたGCPの個数

Y_i : i 番目に用いたGCPの地図から計算した地球上の位置

t_i : i 番目に用いたGCP位置の画素の観測時刻

この補正は、観測画像を地図に精密に合わせるための補正であるので、精密補正と呼ぶ。ある観測画像Aを精密補正する際に、各GCPに対する(2)式の $G(t_i)$ を保存しておき、Aと同じシーンの新しい観測画像A'を補正するとき Y_i の代わりにこれを用いると、この補正は、A'をAの補正画像に重ね合わせる補正となる。これはレジストレーション補正と呼ばれる⁴⁾。

また、本方式では、GCPが存在しない海洋シーンの観測画像を、その隣接陸地シーンのGCPを用いて精密推定した衛星モデルで補正することができる。これを海洋モード補正という。なお、(2)式の解はカルマンフィルタの公式により求まる。

4.3 ひずみ補正(リサンプリング)

以上述べた衛星モデルから得られる幾何学的ひずみ補正関数を用いて観測画像を補正画像座標系に写像すると、観測画像の各画素は等間隔には並ばない。実際には、求める補正画像上の格子点での濃度は、放射計ひずみ補正後に、次のリサンプリング処理により求める。上述のひずみ補正関数の逆関数を用いて補正画像上の各画素の位置を観測画像座標系に写像する(図3(a))。このとき、●点の観測画像濃度データから○点での濃度を求めればよい。このため、同図(b)に示すような補間曲線を作る。補間曲線は観測点の濃度を $g(u', v')$ (u', v' は整数)、補間したい点の濃度を $g(u, v)$ (u, v は非整数)と

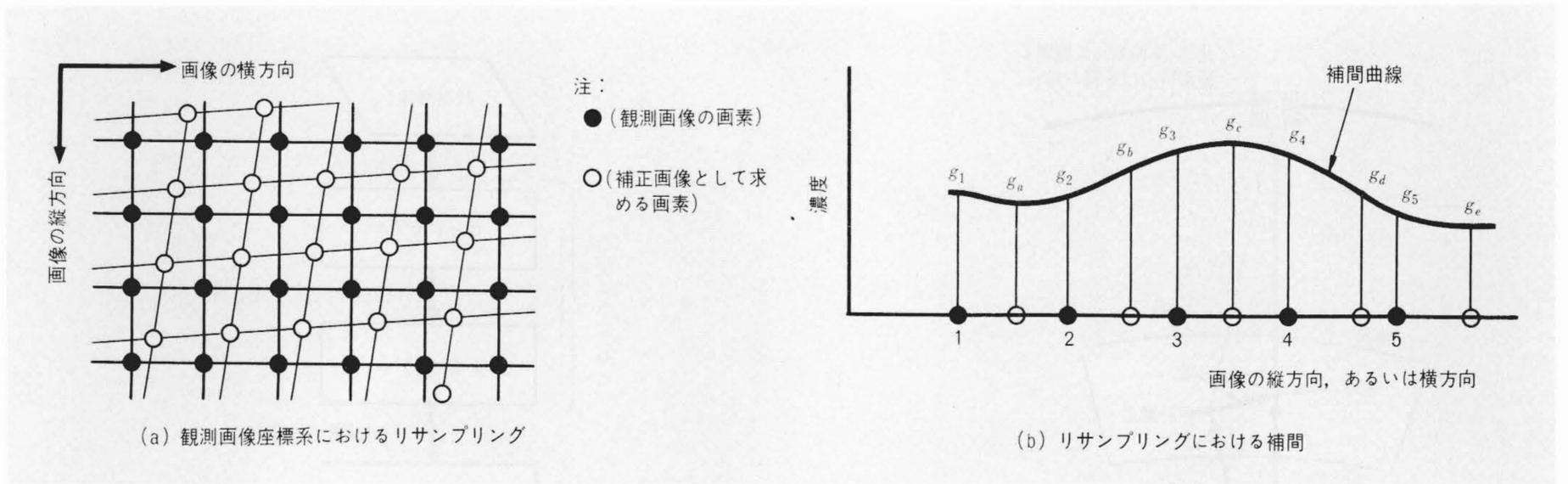


図3 リサンプリングの方法 図(a)に示す●での濃度データから、○での濃度を補間する。例えば、図(b)に示すように g_1, \dots, g_5 の値から g_a, \dots, g_e の値を算出する。

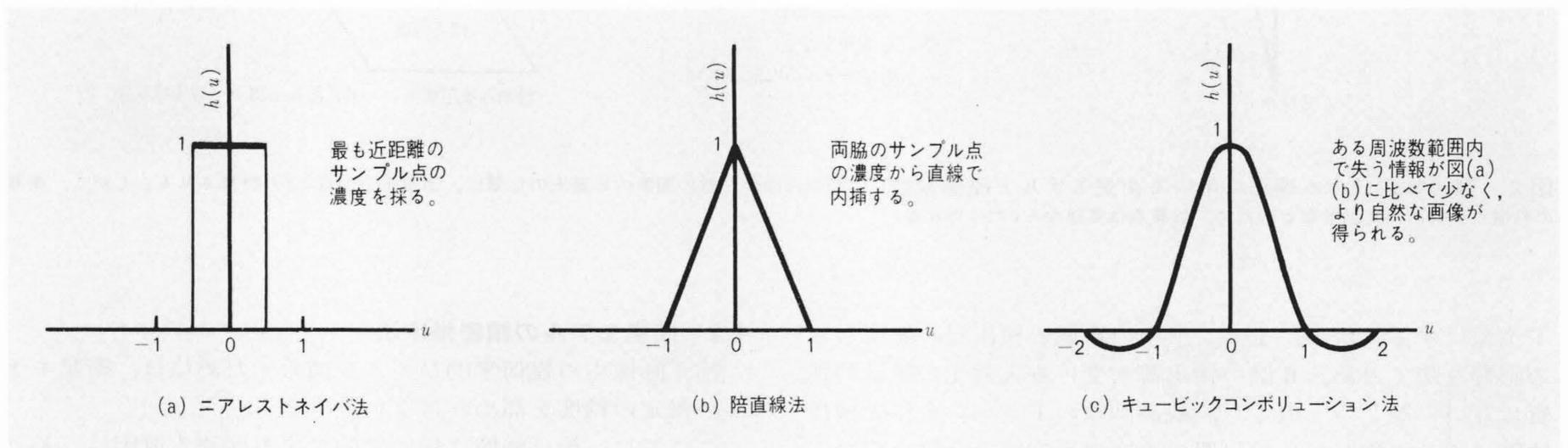


図4 リサンプリングにおける重み関数 補正画像は、リサンプリングに用いる重み関数の採り方によって変わってくる。実用的な重み関数としては、本図のものがある。

すれば、一般に、

$$g(u, v) = \sum_{u', v'} g(u', v') h(u-u', v-v') \dots\dots\dots(3)$$

と表わされる。ここで、 h は重み関数であり、実用的なものとして図4に示す3種類が用いられる。

4.4 補正精度の評価

「ランドサット」画像を用いて行なった精密補正とレジストレーション補正の幾何学的ひずみの補正精度の実測結果⁴⁾と次の数値を得ている。

16個のGCPを用いた精密補正では、これらのGCPの位置で測定した幾何学的ひずみの平均値は、画像の縦方向38m、横方向49mであり、1画素(80m)以内という目標精度を達成している。同様に16個のGCPを用いたレジストレーション補正の場合、画像上に16個×16個の格子を張り、各格子点で相関法により実測した同一地点の異なる観測日の二つの画像の位置ずれの平均値は、画像の縦方向32m、横方向27mである。これは $\frac{1}{2}$ 画素以下である。

なお、1シーン4バンドの観測画像情報を入力し、2,400フィート磁気テープ2巻に補正画像情報を出力するまでの処理時間は約21分である。この時間にはテープからフィルムに画像を出力する時間は含まれていない。

5 結 言

従来、見るができなかった広い範囲の地球表面の状況を居ながらにして見る、更に可視光線以外の目で地球を

見ることを「ランドサット」は可能にした。「ランドサット」が取得した情報はそれがもつひずみを正確に補正して、初めて地表の経時変化調査、資源探査、作柄予測、流水観測、地球環境モニタ、地図作成などに役立つ。

正確な画像を得ることを目的に、ひずみの発生機構を精密にモデル化し、これを用いてデジタル的に画像ひずみを補正する方式を開発し、所期の目標精度を達成することができた。

最後に、この研究の全般にわたり御指導をいただいた多くの関係各位、またデータの利用、その他多くの面について御協力いただいたNASA及び宇宙開発事業団の多数の関係各位、特に地球観測センターの方々に対し、深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) NASA: Data Users' Handbook, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, (Nov.1975)
- 2) 沢田, 外: 解析的方法によるMSS画像の幾何学的歪補正, 日本写真測量学会年次学術講演会予稿(昭53-5)
- 3) J. P. Vinti: Inclusion of the Third Zonal Harmonic in an Accurate Reference Orbit of an Artificial Satellite, J. RES. NBS70B, 1 (1966)
- 4) 高橋, 外: 幾何学モデルを用いた衛星画像の精密レジストレーション, 第22回自動制御連合講演会予稿(昭54-10)