

リモート・センシングのデータ処理

— その現状と展望 —

飯 坂 譲 二

目 次

は じ め に	2
1. データの補正	3
2. センサーの解像度の向上と C C D	5
3. 波長領域の拡大—多重マイクロウェーブ・センサー	5
4. ランドサット・データのディジタル処理システム	7
5. データ解析の並列処理	10
6. データ圧縮とオンボード・プロセッシング	12
参 考 文 献	13

はじめに

ランドサットの受信局設置の気運もたかまり、リモート・センシングの関心は拡がりつつある。ただリモート・センシングの原理等の解説書も多くみられるが、日本の現状は未だ、いま一つ不足の感がある。リモート・センシングの概念にいろいろのとらえ方もあろうがここでは、次のような概念に限定する。すなわち、カナダ・リモート・センシング・センター所長のモーレイ博士は「リモート・センシングとは、地表・海上又はそれに近い大気から放射又は、反射する電磁波等を航空機、人工衛星等が計測し、環境、資源情報収集等に応用しようとする技術である」としている。すなわち広域的な情報をタイムリーに収集することの出来る技術である。

測定の対象となる電磁波は、可視光線のみならず、赤外、マイクロ波領域にわたり又、計測のための光源も太陽光の他、レーザー、マイクロ波を能動的に利用するものもある。日本ではそのうち、可視光線を中心とするMultiband camera(4バンドカメラ等)や11 channelのMSS(Multispectral scanner)が中心でマイクロ波領域、レーザに至っては、実験室レベルで広域的な情報収集に至るにはほど遠く、海外に大きなおくれをとっている。日本におけるリモート・センシングの発展のためには、カバー出来る波長領域やS/N比の向上、計測方法のバラエティーの拡大も大切なことであるが、そのデータの活用、データ処理問題も重要である。

その中であげねばならない問題が多くあるが、技術的な傾向をみると、⁽¹⁾センサーに係る傾向として、(a)固体検出器(CCD等)の採用による解像度の改良、(b)ダイナミック・レンジの拡大、(c)カバーする波長域の拡大、(d)データのデジタル化、⁽²⁾処理にまつわるものとして、(a)高度のデジタル化、(b)スループットの増大、(c)精度の増大の他、(d)データのオンライン蓄積、等があり結果として、ターン・アラウンド・タイムの減少や、情報抽出、その結果の応用へと、その有効利用、実用化への道を急速に進めているといえる。(図1)

そこで、その中からいくつかの事例を引用することによって、リモート・センシングのデータ処理の現状と傾向についての一部を紹介する。

	IFOV	ダイナミック レンジ	スペクトル バンド数	スペクトル 波長域	打ち上げ
ランドサット 1.2	79 m	6 ビット	4	0.5 ~ 1.1 μm	(稼動中)
ランドサット C	79 m	6 ビット	5	0.5 ~ 12.6 μm	(1978)
ランドサット D	30 m	8 ビット	6 ~ 7	0.45 ~ 12.5 μm	(1980)?

図1 ランドサットのMSSと計画

1. データの補正

前処理としての補正の問題はリモート・センシングのデータ処理の中で重要なものである。観測したデータの補正には、幾何的な補正と分光的な補正がある。ランドサットのデータを例にとると、幾何的な補正を必要とする原因として、スキャン・ミラーの速度の変化、検出器のサンプリングのおくれ、スキャンのよじれ、地球の回転、人工衛星の速度、透視位置、姿勢（ロール、ピッチ、振れ）、高度等があり、分光的には、検出器の応答、大気による減衰等がある。ランドサット・1，2のMSSについての歪誤差を表1に示した。

歪 の 原 因	誤 差 (3 σ) 単 位 <i>km</i>
<u>ランドサット</u>	
高 度	1.5 0
姿 勢	
ピッチ	1 2. 0
ロール	1 2. 0
振 れ	2. 4 0
ピッチ率	0. 9 3
ロール率	0. 5 4
振 れ 率	0. 0 4
スキャン・振れ	0. 0 8
速 度	1. 5 0
<u>画 面</u>	
地 球 曲 率	0. 7 5
地球の自転	1 3. 3 0
地 図 撮 影	3. 7 0
<u>センサー</u>	
ミラーの撓引	0. 3 7
<u>画面／センサー</u>	
立 体 歪	0. 1 2
透 視 歪	0. 0 8

表1 ランドサットMSSデータの誤差

センサーの応答の補正はテーブル・ルック・アップの手法等により補正されるが、本レポートでは幾何的補正の精度についての傾向について記す。衛星上で観測されたデータの地上の対応点の座標を求めるには、予め、地上の標高、位置や、画像の上での特徴がはっきりしている地上標定点（GCP）（空港、道路の交差点、ダム、湖、半島の先端）を参照する。

観測した画像データと、GCPデータの相関等の類似性を判定し位置をもとめ、座標を定める。

図2に、MSSの場合について、その画面の平均の位置のずれを用いたGCPの数の関係を示した。図2によると各GCP自体の誤差が0.5画素(RMSで)程度の場合に画像全体の誤差を0.5画素にするには、12点ほどGCPを用いればよい。

図3は、MSSについての幾何的精度向上の傾向を示したものである。現在、絶対座標で0.5画素、GCPに対して、0.3画素の歪におさめる努力がなされている。

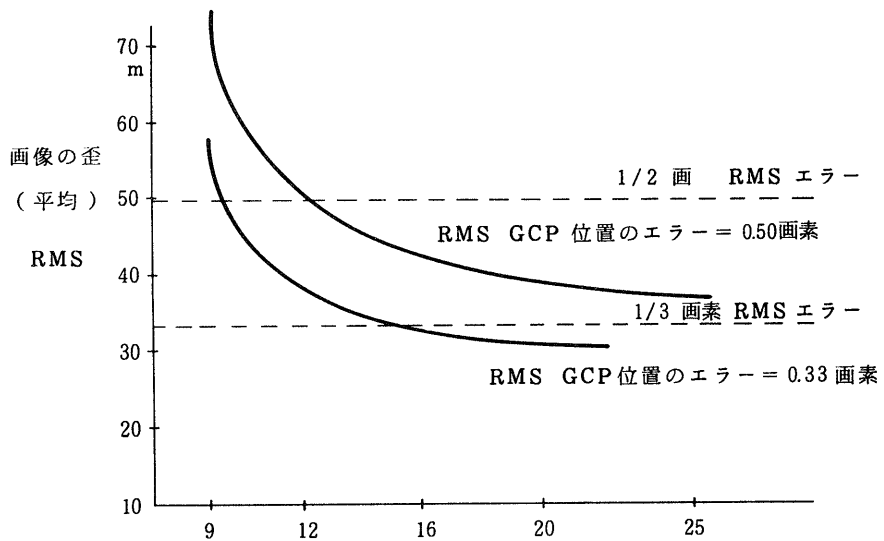


図2. 地上標定点 (G C P) の数

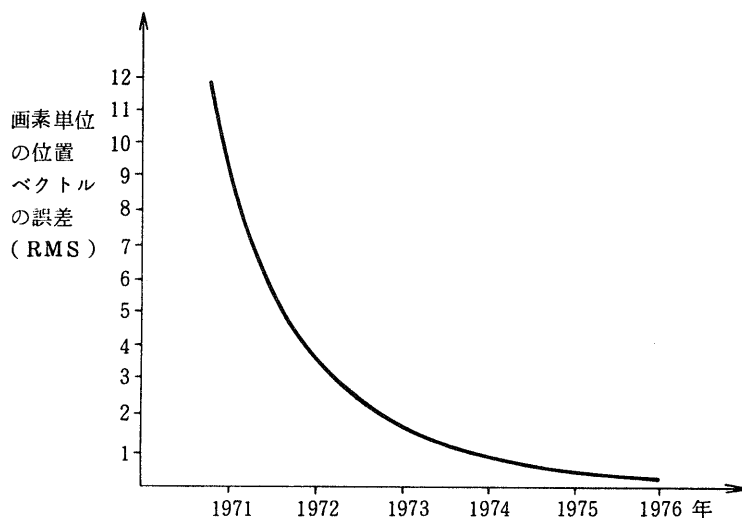


図3. MSS データの幾何歪補正精度の向上傾向

2. センサーの解像度の向上とCCD

航空機のMSS及び、ランドサットのMSSの解像度はカメラ写真に比して低い。これは回転ミラーや、振動ミラー等の走査のため機械系、光学系の性能によって制限されている。航空機のMSSのIFOVは、 2.5 mrad 、ランドサットは、 0.086 mrad である。これらの解像度を更に上げるため、フォト・トランジスター、フォト・ダイオードや、CCD技術を使用したセンサー・アレーを用いた新しい試みがなされている。

固体センサーを用いることによって、解像度の向上が見込まれる。ランドサット用の固体センサーとして、IFOVとして 0.02 mrad が期待出来るので約4倍近くの解像度があがる。機械系をふくまないでミラーの振動による歪がない。光電倍增管(PMT)を検討した時代もあるが、固体センサーの場合は輝度変化とS/Nとの間に線形性が保存され、PMTに比して有利である。特に低い輝度の測定に有利である。又、現在の波長帯域巾 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ に対し、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ の場合についても同じようなS/Nが期待出来る。表2にその比較表を示した。

赤外についても同様のことが期待出来るが熱赤外については未だ開発研究すべき点が残されている。S/Nがよい事は、光学系の設計にも有利である。又、センサーアレーを2次的に配置することによって、バンド数の増加や、フレーム画像を得ることも可能となる。

一方、センサーの配列間のギャップの扱い、配列方法、時系列変化その他検討すべき項もこのさされているが、人工衛星のみでなく、低コストの航空機用MSS等、今後の開発に期待がもてる方向である。

	MSS (現行)	固体アレー・センサー
IFOV (μrad)	86	20
高 度 (km)	920	920
f / #	3.6	5
Band Radiance (μm) ($\text{W}/\text{m}^2\text{-sr}$)	S/N	S/N
.5 - .6 2.5	41	68
.6 - .7 2.0	31	54
.7 - .8 1.8	24	49
.8 - 1.1 4.6	13	125

表2 ランドサットの現行MSSと、固体アレー・センサーの比較

3. 波長領域の拡大—多重マイクロウェーブ・センサー

可視・赤外領域外の波長を用いたセンサーに、マイクロ波センサーがある。可視・赤外を中心にしたリモートセンシングのセンサーは地表被覆物の反射・放射特性を主に測定

している。又、太陽光をエネルギー源としており、夜間、悪天候等の条件では観測不可能である。これに対し、マイクロ波領域の観測は有利である。マイクロ波の観測は、温度測定等のための受動センサーも用いられるが、古くは、SLAR (Side Looking Airbone Rader) のように能動センサーが用いられている。マイクロ波センサーを搭載した人工衛星として、シーサット (1978年) が計画されている。

マイクロ波領域のセンサーは、反射特性のみならず後方散乱の特性や、偏向特性までを測定している。X-バンド (3.2cm) の単一チャンネルの、マイクロ・ウェーブ・センサーは、1960年代の終り頃から研究されているが、1970年に入りL-バンド (2.5cm) のセンサーも開発され、現在は、合成開口アンテナの2波長・2重偏向のチャンネル・レーダーが開発され、ERIMで研究が続けられている。

このようなレーダーをリモート・センシングに用いると、例えば、穀物同定の上で、レーダーの反射が、相対的な草丈、密度、表面の粗さ等によって影響を受け (図4)、又偏向特性が穀物分類の上で有効な情報を提供してくれることによる。ERIMのマルチチャンネルのSAR (Synthetic Aperture Rader) の諸元を表3に示した。

マルチチャンネルのSARは、図5のよに、①送受信器、②レコーダ、③システム・タイミング、④航法システム、⑤運動補正システム、⑥アンテナから構成されている。

航法システムは、レーダー波の位相シフト、オフセットの調整、アンテナの安定化等にもちいられ、又合成開口アンテナが、直線に沿って進行しているとして、エコー信号の位相に着目しているので解像度のよいデータを得るためにファイングレイン位相補正を行っている。

データ・コードは、70mmのフィルム上でアスティグマ・フレネル・ゾーン面にスーパージョーズされ、その画像として再構成される。

今後の傾向としては、信号記録のデジタル化と光学処理に変わるデジタル化、Kバンドの導入がある。

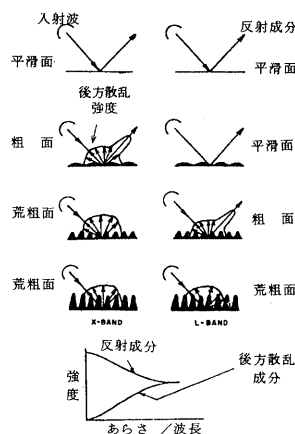


図4 レーダ波の後方散乱の表面の粗さへの影響

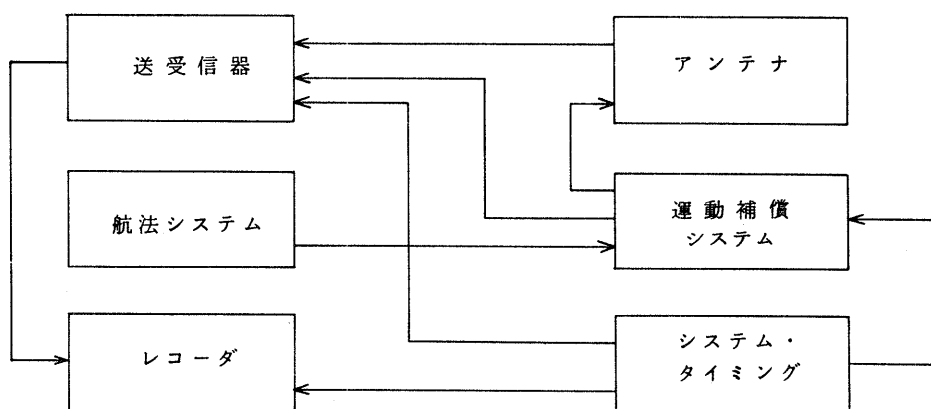


図 5. X-Lレーダシステムの構成

	X-バンド	L-バンド
センター周波数	9.450 GHz	1.315 GHz
解像度	Variable from 30 x 30 ft to classified	
送信器	1.2 kw 2%DC	6 kw 2%DC
アンテナ・ゲイン	28 dB	16.5 dB
アンテナ・ビーム巾	1.1°	7°
偏向度	23 dB	19 dB
ディプレッション・アングル	0° to 90°	0° to 90°
Range	24 km	24 km
CRT	WX30267P11	WX30267P11
スポット数/スキャン	8,000	4,000
フィルム容量	100 ft (30.5m)	100 ft (30.5m)
使用フィルム (コダック)	Microfile 5460	Microfile 5460

表 3 ERIMマルチ・チャンネル・レーダの仕様

4. ランドサット・データのデジタル処理システム

従来、ランドサットのデータ処理はゴダード宇宙センター (GFC) において、データ磁気テープから簡単な補正を行った 70 mm のフィルムを作成し、それを拡大焼増しを行ったものが、利用者に配布されるシステムを採用していた。CCT (Computer Cmpatible Tape) 自体も再び写真のデジタル化を行って得られたものである。(図6) ランドサットのデータ自体PCM化ははかられ、画素当り6ビットの情報として地上に送られている

ものである。従って、デジタル化されているデータを最終段階における映像化以外は全てデジタル的な処理を行うシステムが望ましいが、77年の4月からGFCにて稼動するシステムはこの方式を採用している。精度は、旧システムが1～2画素に対し、新システムでは、 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 画素に改良されており、また1シート当りの処理も35～40分から2分まで減少する。

この処理時間の減少の傾向は、図7のようにコンピュータの処理速度の増大のみならず、リモート・センシングのデータ処理専用機の実用化しつつあることによる。最新のものGFCで利用するMDPS (Master Processing System)で、マイクロ・プログラムの可能な高速プロセッサ (ASP-202) を使用している。多重のデータ・バス・パイプライン方式の演算問題等を採用している。データレートは、2.5 MHz に至り、ランドサットデータの実時間入力が可能な範囲である。このASP-202は、32 kw の記憶容量をもつコントロール・プロセッサと、64 kw のバルク記憶装置と、2つのパイプライン・プロセッサからなり、放射系の補正、校正、標定点処理と、幾何的メッシュ計算を行う。(図8、9)

一方電送されてくるデータの貯蔵についてもオンライン化に向い、大容量の外部記憶装置(全米を23回カバーする程度の容量をもつ)にランドサットのデータをデジタル的に保存し、後の処理の便がはかられている。

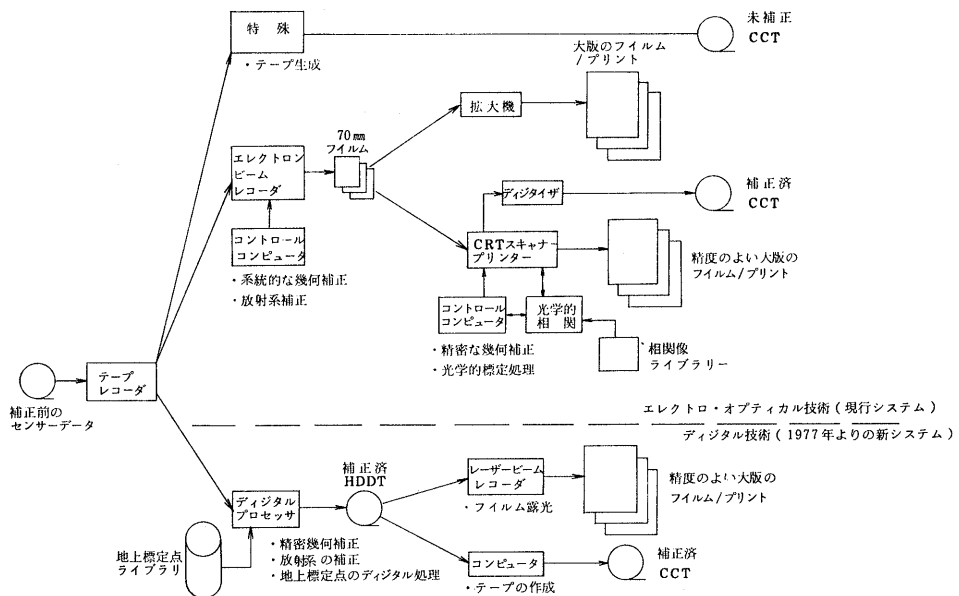


図 6. リモート・センシング・データ処理の流れ (現行システムと新システムとの比較)

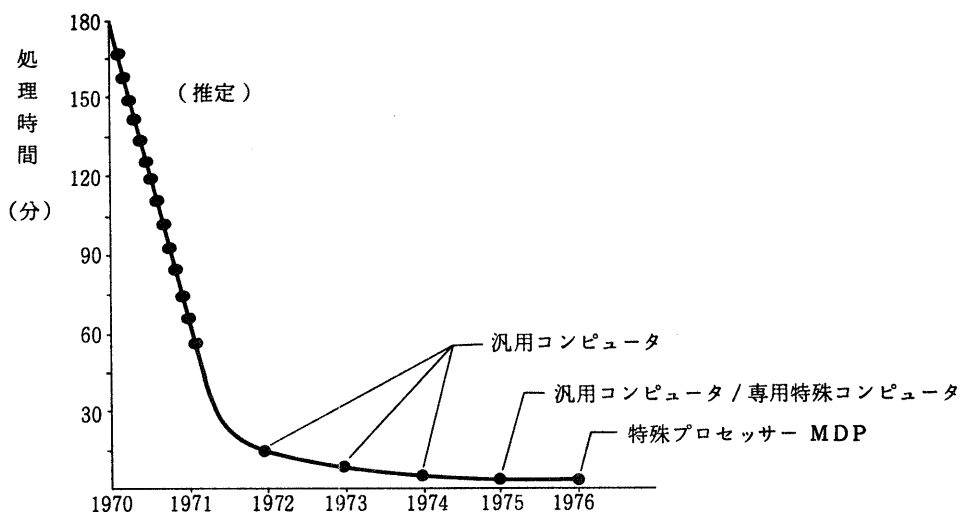


図 7. ランドサット・データのイメージ処理時間の減少傾向

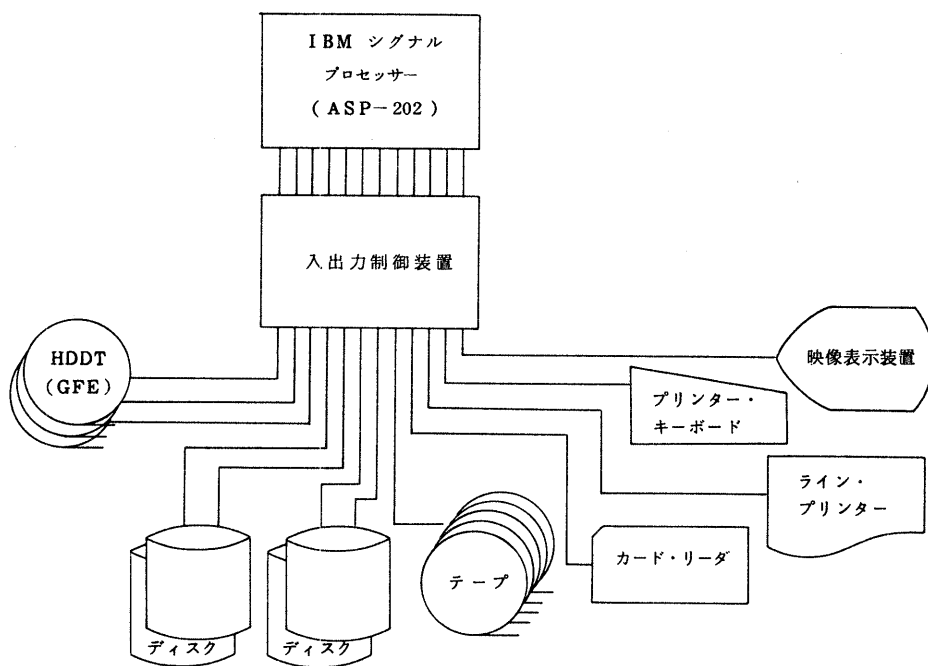


図 8. MDP (Master Date Processing) システムの構成

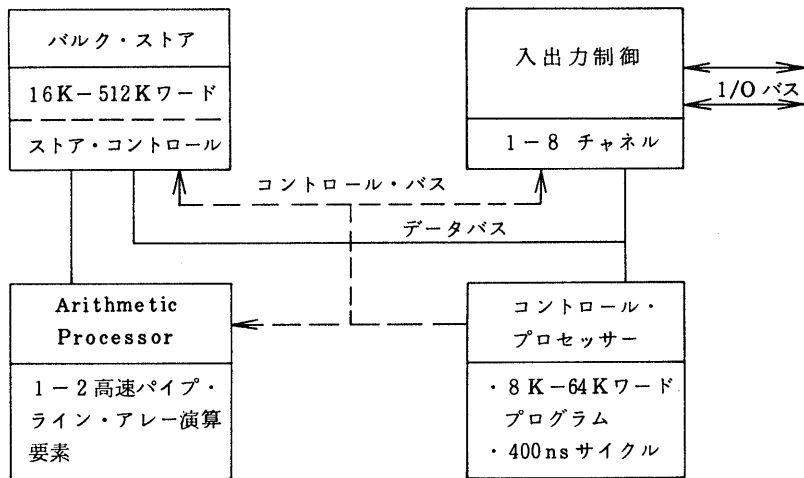


図 9. ASP-202 の構成

5. データ解析の並列処理

リモート・センシングのデータ解析の目的に地表状態の分類がある。分類の手法は、リモート・センシングのデータの分光的な測定が基礎となっているので、通常の空間的なパターン認識の手法より、スペクトル空間でのパターン認識の手法を用いている。最近では、スペクトル空間での分類に加え、テクスチャ解析や、グローバルな空間構造的な情報を加味した分類を行った試みが報告されてはいるが、手法の研究の域も出ていない。

スペクトル空間での分類手法の中で最も多く採用されているのが最尤法である。これは同質のカテゴリー画素単位のデータの分布がカウス分布であることを仮定したものである。これに対し、領域単位の分類や、ガウス分布とは異った分布に対する分類手法の研究も行われている。データ処理時間からみると、画素単位毎の計算に比して、領域単位の処理時間は急増するのでこれもまた、研究的なレベルにあるといえよう。

画素単位の計算の中で最尤法はよく用いられている手法であり、多くのコンピュータ・システムの機能に準備されているケースが多い。

一方データ処理時間はデータ量、分類クラスの数によるが、一般には大きな計算時間がある。リモート・センシングのデータ解析は未だ完全自動システムではなく、マンマシン・システムによる解析が進められている。従って解析オペレータの思考時間のスピード（例えば次の解析の結果の判読から次の意志決定が行われるまでの時間）にマッチした処理時間が要求される。このような事情から処理性能の向上が望まれているが、その一つのアプローチとしてERIMの並行処理解析を行うシステムがある（同様のシステムも西独で研究が行われている）。LSI等の進歩がこのようなアプローチを可能にしたともいえる。

以下、その概要を示すが、対価性能比として約20倍の向上がみこまれている。これはランドサットの4バンドデータ(約 8×10^6 画素)の画素単位分類処理に対して40秒(但し、テープ転送速度の制約あり)の処理が可能となっている。ERIMの並行特殊処理システムは、通常のコンピュータ・システム(PDP-11/45)の他、マルチ・スペクトル・データの分類に利用するデジタル並行プロセッサからなっている。分類のアルゴリズムは最尤法を採用している。この利用は、最尤法による分類がERIMやLARS(パデュー大学, Laboratory of Application for Remote Sensing), NASA, その他で各100以上のケースについて、実証済であることによる。

最尤法の計算は、マルチ・チャンネルのデータ・ベクトルに対し、ガウス形の確率密度関数 $\text{Pr}(X)$ と、

$$\ln(\text{Pr}(X)) = -\frac{1}{2} \{ (X-M)^T O^{-1} (X-M) + \ln |D| + n \cdot \ln(2\pi/2) \}$$

が計算される。

O^{-1} は、分散-共分散マトリックスの逆行列、 M は、各クラスの平均ベクトルで、計算時間は、チャンネル数と分類クラスの数によって増大する。

分散-共分散行列 O は相関行列 P と、標準偏差の対角行列によって、

$$O = [\sigma][\rho][\sigma] \text{として表現され、}$$

$$Q = (X-M)^T O^{-1} (X-M) \text{は}$$

$$Q = \left[\frac{X-M}{\sigma} \right]^T [\rho]^{-1} \left[\frac{X-M}{\sigma} \right] \text{となる。}$$

入力ベクトルが、 $8\sigma_i$ 以上の範囲にあるとき、すなわち

$$-1 \leq (X_i - M_i) / 8\sigma_i \leq 1 \quad \text{をこえるとする、}$$

そのデータがクラス i に属するとは考えにくい。 ρ の対象性を利用すると、計算は更に簡単になる。

$$[Y] = [B] \left[\frac{X-M}{\sigma} \right] \quad \text{とすると} \quad (B \text{は} \rho \text{の上半分の三角行列})$$

$$Q = [Y]^T [Y] = \sum y_i^2 \quad \text{となる} \quad (y_i \text{は} Y \text{の特殊要書})$$

そこでこの種の計算をハードウェアで行い、並行処理を行うプロセッサを開発したもので、その基本ブロック図を図10に示した。

そのステップは ① チャンネル毎に平均をひく。

② その結果に $1/\sigma$ を乗ずる。

③ Y 行列をつぎにもとめる。

④ $\sum Y^2$ をもとめる。

⑤ $\ln |D|$ 等の加算を行い

⑥ 結果を比較して分類コードをつける。

入力チャンネル数は、分類出来るクラスの数の並行処理回路の数により、16チャンネルの信号に対し、17クラスの分類までの平行処理が可能であり、
判別速度は $200 \times 10^3 / \text{sec}$ である。

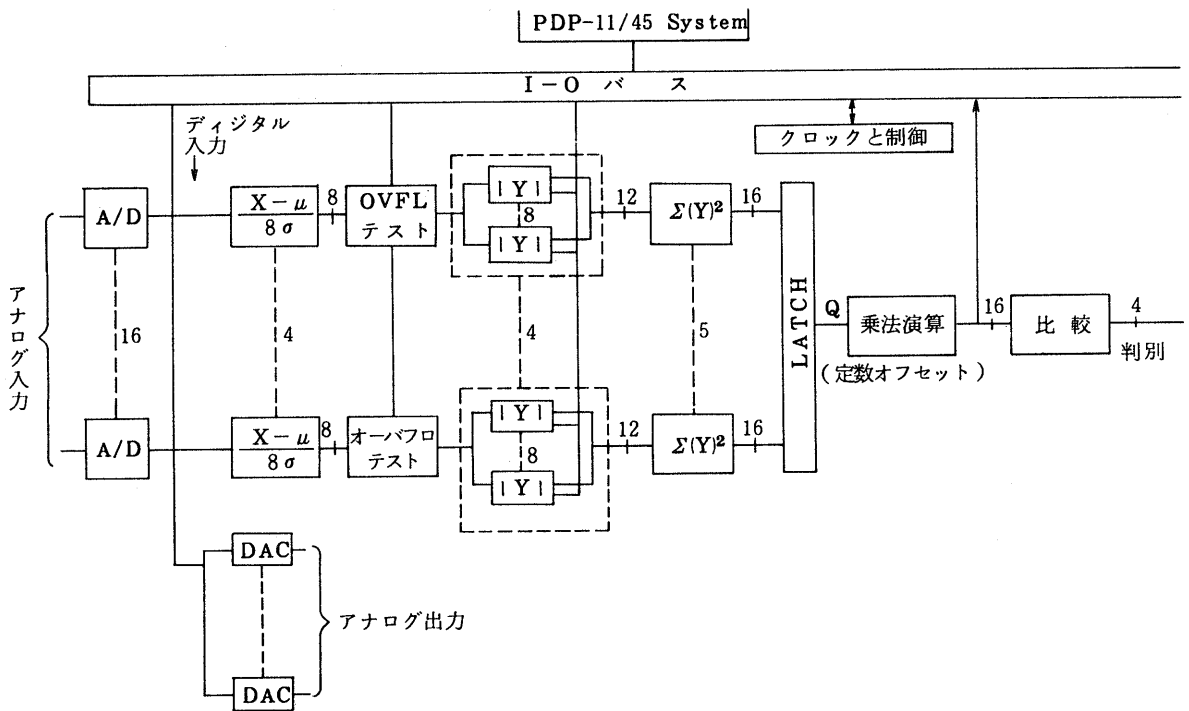


図 10. E R I M (ミシガン環境研究所) のリモート・センシング・データ並列処理

6. データ圧縮とオンボード・プロセッシング

解像度が高まり、波長帯域の増大、チャンネル数の増大に伴い、その情報量は急激に増大する。それらのデータの記録、地上への通信、地上での処理能力、機上での電力その他諸条件下で十分な容量を持ち得るとは限らない。そこで、なんらかのデータ圧縮を行った形式での記録、通信、処理方法の検討がせまられている。

通信容量の軽減のためデータ圧縮の他、MSSデータのような幾何的補正、視野角による大気の影響の除去等、画像の前処理をオンボードで行おうとする試みも検討されている。航空機／人工衛星の何れにせよ、1980年代にあつては特定のテーマ、目的別(例、環境モニター、農業生産予測等)に設計されたものが実用的に運用されることが予測されている。その時代にあつては、現状のように一次測定データをそのまま地上に送り、地上の

データ処理システムで、汎用のデータを生成・配布するシステムとは異り、効果的なデータ処理を機上で行って、それを利用者毎に送る方式となろう。現在はそのための方式の検討、処理方法、経済性、応用分野の順序付けが行われている。これは、N A S Aに限らず、ヨーロッパでも行われており、シミュレータを用いて、その評価を行っている。将来のランドサットに対しては、応用分野として①農業、②沿岸、近海の調査、③森林、④地図、⑤地質、⑥水利、⑦気象、⑧海洋、の諸分野をとり上げ、クラスターリング、最尤法、テーブル・ルック・アップ等の手法を用いて、必要な解像度、必要チャンネル数から必要なビット・レートを出し、特徴抽出のアルゴリズム、前処理の方法、必要なICの個数等から総合的な評価を行う。その結果、広い応用分野をカバーする上で、①テーブル・ルック・アップ、又は最尤法のアルゴリズムがよいが5チャンネル以上のチャンネルを必要とする以外は、テーブル・ルック・アップ方法がよい、②オンボード・プロセッサの利用がデータ負荷の上で有利である、③オンボードのプロセッサの能力は1975～1985の間に2倍になり得る。マイクロコンピュータの使用によって能力、コスト、体積、重さの諸面で有効なプロセッサが作製されることがいわれている。具体的な事例としては、ERIMが計画しているオンボード・プロセッサがある。これは、CCD等(1976年秋現在)で検出された信号を読みだした直後に前処理回路(線形結合回路)を通し、最尤演算処理を行って、オンボードで分類してしまう方法で、回路を小形化し、オンボードで利用しようとするものである。

参 考 文 献

- | | | |
|----------------------|---|-----------------|
| A. Habbi, S. Sanulon | Band Width Compression of Multi-spectral Data, SPIE Vol. 66 (1975) 23 | |
| A. Habibi | Study of on Board Compression of Earth Resources Data, Sept. 1975 | NASA CR 137752 |
| R. Meneghini | Review of Data Analysis Procedures for the ATS-6 Millimeter Wave Experiment, Aug. 1975 | NASA TM-X-71023 |
| R.E. Bodenheimer | Satellite on Board Processing for Earth Resources Data | NASA CR-137757 |
| M. Griggs | Determination of Aerosol Content in the Atmosphere from LANDSAT Data, Oct. 1975 | E76-10067 |
| L.J. Ippohito | Twenty and Thirty GHz Millimeter Wave Experiments with the ATS 6 Satellite, Apr. 1976 | NASA TN-D-8197 |
| R.M. Hoffer | Computer-Aided Analysis of LANDSAT-1 MSS Data: A Comparison of Three Approaches, Including a Modified Clustering Approach, 1975 | E76-10292 |

- C.J. Baldwin Functional Design for Operational E76-10346
Earth Resources Ground Data
Processing, Sept. 1972
- E. Bruederle Study on the Compression of Image ESA-CR(P)-770-VOL-1
Data on-Board of an Applications or
Scientific Spacecraft, 1975
- F. Kriegler, R. Marshall, S. Lampert, M. Gordon, C. Connel, R. Kistler
Multivariate Interactive Digital
Analysis System (MIDAS) ERIM Report
Aug. (1973)
- L.L. Thompson Silicon/Solid State Linear Array
for Multispectral High Resolution
Image System Proc. SPIE Vol. 1
(1974) 132
- Adam Kozma & Charles R. Christensen, "Effects of speckle on resolution",
J. Opt. Soc. Am., Vol. 66, No. 11, Nov. 1976 pp 1257~1260
- R. Rawson, F. Smith & Larson, "The ERIM Simultaneous X- and L-Band Dual
Polarization Radar", IEEE International Radar Conf. pp 505~510
- A. Kozma, E.N. Leith & N.g. Massey, "Titled-Plane Optical Processor",
1766 Applied Optics, Vol. 11, No. 8, Aug. 1972
- Robert A. Shuchman, Carl F. Davis & Philip L. Jackson, "Contour Strip Mine
Detection and Identification with Imaging Radar", IEEE International
Radar Conf. pp 516~521
- D.A. Ausherman, W.D. Hall, J.N. Latta & J.S. Zelenka, "Radar Data Processing
and Exploitation Facility", IEEE International Radar Conf. pp 493~498
- Robert A. Shuchman, Robert F. Rawson & Ben Drake, "A Dual Frequency and Dual
Polarization Synthetic Aperture Radar System and Experiments in
Agriculture Assessment", NAECON '75 Record, pp 133~140
- M. Leonard Bryan, "Classification of Freshwater Ice Using Multispectral
Radar Images", IEEE International Radar Conf., pp 511~515
- R.A. Shuchman & C.F. Davis, "The ERIM Four-Channel Synthetic Aperture Radar
Applied to the Geosciences", Jan. 1976
- A. Kozma & R.W. Larson, "Application of Synthetic Aperture Radar (SAR) to
Remote Sensing", ERIM