

気象衛星センター技術報告（特別号Ⅱ—1）

GMS システム総合報告

Ⅱ データ処理解説編

その1



気象衛星センター

昭和54年9月

目 次

第 II-1 部

データ処理概要	角 俊 治.....	(1)
1. データ集配信処理.....	竹 内 賢.....	(9)
2. 通報局からのデータ収集	竹 内 賢.....	(13)
3. GMS の モ ニ タ ー	野 瀬 純 一.....	(15)
4. コ マ ン ド 処 理	木 村 光 一.....	(19)
5. 宇宙環境モニタ (SEM) サブシステムのデータ処理.....	河 野 毅.....	(23)
	山 下 喜 弘	
6. 軌道データ処理	北 村 利 次.....	(31)
7. 姿勢データ処理	宮 沢 勇.....	(41)
	井 石 明 宏	
8. 画像前処理	由 田 建 勝.....	(61)
	中 島 忍	
	中 村 健 次	
9. FAX 画像データの作成.....	由 田 建 勝.....	(77)
	高 橋 大 知	
	安 藤 義 彦	

I-2 目 次

GMS 通信システム概要
空中線装置
送信系装置
受信系装置
テレメトリ系装置
コマンド系装置
測距系装置
FAX 系装置
システム・アナライザー
周波数標準装置
通信制御装置
画像モニタ装置
DCP 系装置
PCM マイクロ通信系装置
試験調整用照準塔
利用局
VISSR 系装置
高分解能/低分解能 FAX 受信機
WMO 標準規格 FAX システム
レーザービームレコーダ

Contents

II Data Processing Part 1

An Introduction to the Data Processing System.....	Toshiharu SUMI...(1)
1. Data Receipt and Distribution System	Masaru TAKEUCHI...(9)
2. Data Collection Platform Data (DCP) Editing System...	Masaru TAKEUCHI...(13)
3. GMS Monitoring System	Junichi NOSE...(15)
4. Command Processing.....	Koichi KIMURA...(19)
5. Space Environmental Monitor Data Processing	Tsuyoshi KONO...(23)
	Yoshihiro YAMASHITA
6. The Orbit Determination and Prediction System	Toshiji KITAMURA...(31)
7. Attitude Determination and Prediction System	Isamu MIYAZAWA...(41)
	Akihiro ISEKI
8. VISSR Data Initialization System	Tatekatsu YOSHIDA...(61)
	Shinobu NAKAJIMA
	Kenji NAKAMURA
9. Mapping and Display of Image Data	Tatekatsu YOSHIDA...(77)
	Taichi TAKAHASHI
	Yoshihiko ANDO

I—2 Contents

An Introduction to the GMS Communication System
S-Band Antenna Subsystem
Transmitter Subsystem
Receiver Subsystem
Telemetry Subsystem
Command Subsystem
Trilateration Ranging System
FAX Subsystem
System Analyzer
Frequency Standard Unit
Communication Control Unit
Image Monitor
Data Collection Subsystem
Micro-Wave Link
Collimation Tower
Data Utilization Station
VISSR Data Acquisition System
HR/LR FAX Subsystem
JMH Facsimile Subsystem
Laser Beam Recorder

データ処理概要

An Introduction to the Data Processing System

Abstract

The Data Processing System's configuration and its role in the GMSS (Geostationary Meteorological Satellite System) are summarized as an introduction to this volume.

1. データ処理システムの構成と役割

データ処理システムは電子計算機システムと写真解析システムとからなり、1) GMS のミッションを達成するための衛星運用、2) 取得されたデータの処理及び 3) 処理結果の配布、保存を行なう。

衛星の軌道、姿勢及びスピンの制御並に衛星のメンテナンス等衛星の管理に関する運用は宇宙開発事業団が実施することになっているので、気象庁の運用は VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 画像の取得、衛星経由利用局向けの FAX 配信、測距局を使用する三点測距及び通報局 (DCP) データの集取である。

上の運用によって得られる VISSR 画像データ、PCM (Pulse Code Modulation) テレメトリーデータ、リアルタイムテレメトリーデータ、三点測距データ及び DCP データは電子計算機システムに入力されて処理される。

また、VISSR 画像をもとに作成される HR-FAX (High Resolution Facsimile) 図は写真システムにより種々加工され電子計算機システムから出力される気象パラメータ等を加えて解析され、雲解析図が作成される。

これら処理結果は伝送回線等により気象庁本庁へ、また衛星経由利用局 (FAX のみ) へ送られる。

データ処理システムの概略の構成及び隣接のサブシステムを含めたデータの流れを Fig. 1 に示す。

2. 衛星の運用

衛星の運用は CDAS (Command and Data Acquisi-

tion Station) のコマンド・エンコーダからコマンドを送出して行なわれる。衛星はその機能上 VISSR 画像取得、FAX 配信及び三点測距を時分割で行なはざるを得ないので、それを効率的に行なうため定められたスケジュールに従ってオンライン系計算機からコマンドデータをコマンドエンコーダに送り、リアルタイムにコマンドを発信して運用する。この際オンライン計算機では衛星から送られてくるテレメトリーデータ及び CDAS からの CDAS 情報により衛星及び CDAS 機器の状態を監視しまた一部 CDAS 機器の状態セットを行なうことが必要である。

衛星の運用については第 3 章及び第 4 章で詳しく述べられる。

3. 電子計算機システムにおけるデータ処理

電子計算機システムに於けるデータ処理の目的は VISSR 画像データの処理が主眼であるが、その他 DCP データ、SEM データ及び前節で述べた衛星運用のためのデータ処理がある。これらは次の処理に分割される。

- I) 画像前処理
- II) FAX 画像データ作成処理
- III) 運用管制データ処理
- IV) 通報局のデータ収集編集処理
- V) 画像準備処理
- VI) 軌道、姿勢処理
- VII) 風計算処理
- VIII) 放射海面水温処理
- IX) 雲量分布処理
- X) 雲頂高度処理

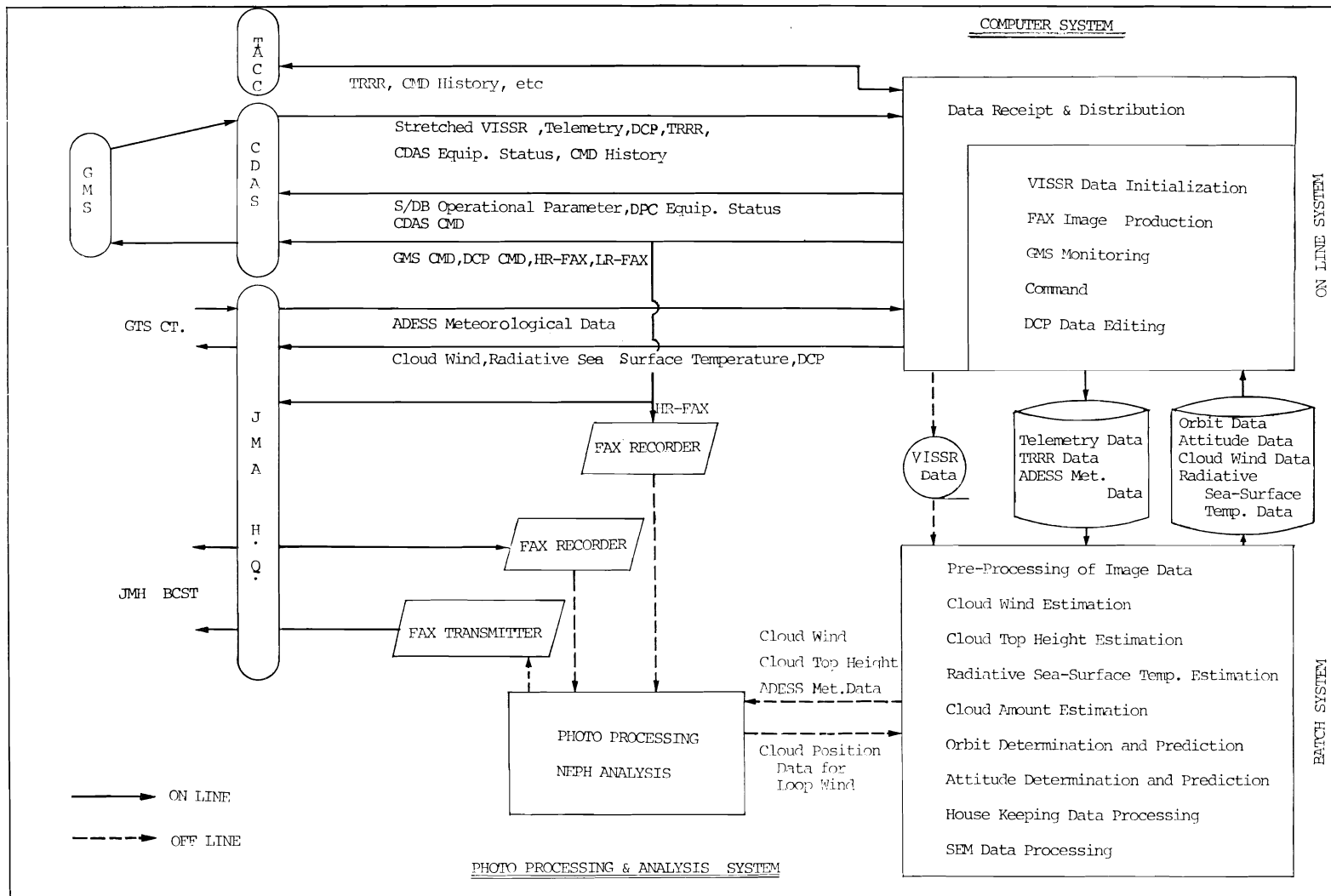


Fig. 1 Configuration and Data Flow of Data Processing System.

Table 1 GMS Operation Schedule

JST	GMT	0	10	20	30	40	50	60
9	0	7	IR DISC-0	21	25	LR-VIS-0	58	
10	1			21	VIS DISC-0	35	47	TRRR 1
11	2	7	IR MT-0	21	33	VISSR-3		0
12	3	7	IR DISC-3	21	25	LR-VIS-3	58	
13	4	7	LR. TP	11				
14	5	7	TP. JNAL	21	33	VISSR-6		0
15	6	7	IR DISC-6	21	25	LR-VIS-6	58	
16	7			21	VIS DISC-6	35	47	TRRR 7
17	8	7	IR MT-6	21	33	VISSR-9		0
18	9	7	IR DISC-9	21	25	LR-IR-9	58	
19	10	3	VISSR-W 11	30	33	VISSR-W 12		0
20	11	3	VISSR-W 13	30	33	VISSR-12		0
21	12	7	IR DISC-12	21	25	LR-IR-12	58	
22	13					47	TRRR13	57
23	14	7	IR MT-12	21				
0	15				33	VISSR-16		0
1	16	7	IR DISC-16	21	25	LR-IR-16	58	
2	17				33	VISSR-18		0
3	18	7	IR DISC-18	21	25	LR-IR-18	58	
4	19					47	TRRR-19	57
5	20	7	IR MT-18	21	33	VISSR-21		0
6	21	7	IR DISC-21	21	25	LR-IR-21	58	
7	22	3	VISSR-W 1	30	33	VISSR-W 2		0
8	23	3	VISSR-W 3	30	33	VISSR-0		0

Table 2 Data Products of Geostationary Meteorological Satellite System (GMSS)

1. Primary data (cloud imageries)

Type of data	Region and scale of imageries	Effective picture size	Spatial resolution at sub-satellite point	Output time	Data distribution
Full-disc pictures	Full disc imageries of GMS coverage with gridding and coast lines	558×457 mm	Vis: 2.5 km IR: 5.0 km	Vis: 0, 6 Z IR: 0, 3, 6, 9, 12, 16, 18, 21 Z Vis: 0, 3, 6, (9), (21) Z IR: 0, 3, 6, 9, 12, 16, 18, 21 Z (): not available in winter seasons	To international users through GMS HR-FAX transmission To JMA HQ
Partially enlarged full-disc pictures of Japan and its vicinity region	15°N to 50°N and 115°E to 155°E with gridding and coast lines (1:7 to 1:11 millions)	do	Vis: 1.25 km IR: 5.0 km	Vis: 0, 3, 6, Z IR: 9, 12, 16, 18, 21 Z	To JMA HQ
Polar stereographic-projected pictures	Corresponds to Asia Pacific synoptic chart (northern hemisphere) with gridding and coast lines (1:20 millions at 60°N)	do		Vis: 0, 6 Z IR: 0, 6, 12, 18 Z	To JMA HQ
Mercator-projected pictures	36°N to 36°S with gridding and coast lines (1:20 millions at 22.5°). Not available when special observation is made	do		IR: 0, 6, 12, 18 Z	To international users through GMS HR-FAX transmission
Seven-sectorized pictures	A full disc pictures is divided into seven portions and they are output in series with gridding and coast lines	209×209 mm	Vis: 4 km IR: 6 km	Vis: 0, 3, 6, (9), (21) Z IR: (9), 12, 16, 18, (21) Z (): either Vis or IR pictures will be transmitted.	To international users through GMS LR-FAX transmissions

2. Secondary products (data derived from cloud image data)

Type of data	Region of interest	Description	Output time	Accuracy of data	Data distribution
Neph-analysis charts	1:20 million stereographic charts (same as Asia-Pacific synoptic charts). Region is; N limit: a line on which elevation angle to see GMS is 30° S limit: 5°N E limit: 170°W approx. W limit: 100°E approx.	Identification of specific clouds, cloud-top height, and growth and movement of cloud. Identification of sea-ice and fog, comments for weather forecasters.	4h 18 m after observation time of 0, 6, 12 Z and 5h after that of 18 Z.		To domestic and international users through JMA's weather facsimile broadcast in short wave, "JMH".
Wind vector data	Region in which elevation angle to see GMS is greater than approx. 35° (50°N to 50°S at 140°E and 90°E to 170°W at the equator).	One or two wind vector data (three is the target) derived from cloud tracking in a region of 5° in longitude and latitude (ocean region only).	Approx. 4h after observation time of 0, 12 Z.	3 m/s at the sub-satellite point.	To JMA HQ and international weather services through GTS in a digital form of FM 88-VI EXT.
Radiated sea-surface temperature	do	Mean sea-surface temperature over 10 days and a month of each in longitude and latitude.	Every 10 days (10 days mean data).	2°C or better	To JMA HQ and international weather services through GTS in a digital form of FM 88-VI EXT.
			Monthly (monthly mean data).	do	To JMA HQ.
Cloud amount distribution	do	Mean cloud amount over 5 days and a month (35 days in August only) in a region of 1° in longitude and latitude (ocean region only). Cloud amount distribution is output as charts in the form of contour for total cloud amount, high and low altitude cloud amount.	Every 5 days and monthly.		To JMA HQ.

XI) SEM データ処理

XII) HK データ処理

I)～IV) はオンライン系計算機で行なはれるが、与えられたスケジュールに従って衛星との関連で効率よく処理をするために特殊な管理プログラム（運用スケジューラ）によりきめ細かく資源管理、時間監視及び障害対応処理を行なっている。運用スケジューラはあらかじめ入力されているスケジュールデータプロセスを参照して処理を消化していくが、スケジュール・コンソールからの入力によりそれを変更することが可能である。この管理プログラムはバッチ系計算機との間の共用ディスクファイルのアクセスの管理も行なう。

また、隣接サブシステムとの間の伝送回線を通してのデータ入出力及びオンライン系の処理プログラムとのデータの受渡しはデータ集配信プログラムが行なう。(第1章参照) DCP データはオンライン系で編集し ADESS (Automatic Data Editing and Switching System) に配信される。(第2章参照)

オンライン系計算機で取得された VISSR 画像データは磁気テープでバッチ系計算機に渡され、MM法による風計算処理、放射海面水温処理、雲量分布処理、雲頂高度処理及び精姿勢処理に使用される。これらの処理のうち画像処理コンソールを使用するため画像データをブロックに細分化をする必要のあるものについては画像準備処理によりブロック化を行なったデータを入力として使う。(第Ⅱ-2部参照)

その他の取得データはオンライン系計算機とバッチ系計算機で共用されるディスクパックを通してバッチ系に渡され処理される。即ち、PCM テレメトリデータから抽出される宇宙環境モニタ (SEM) データ及び衛星の内部状態に関するハウスキーピング (HK) データは編集処理をして出力される。(第5章、第3章参照) また、リアルタイムテレメトリデータ (サンセンサー、アースセンサーのタイミングデータ) は粗姿勢の決定・予測に、三点測距データは軌道の決定・予測に使用される。(第7章、第6章参照)。ADESS から入力される一般気象資料は一部風計算結果の品質管理に使われる外 雲解析の補助データとするためラインプリンタに出力される。

以上の処理結果はラインプリンタまたは X-Y プロッタに出力されるが、風計算結果及び放射海面水温データは共用ディスクパックを通してオンライン系計算機に渡されて ADESS に配信される。また軌道、姿勢の決定予測データも同様にしてオンライン系計算機の画像前処理に渡され VISSR 画像取得のためのタイミングデータ及び画像処理用の座標パラメータが作成される。(第8章

参照)

4. 写真解析システムにおける処理

写真解析システムでは VISSR 画像をアナログ的に解析し、気象庁無線模写通報 (JMH) のための雲解析図を作成し配布するとともに、これにもられない気象実況の把握及び予、警報等の精度向上に役立つ情報を衛星気象情報として全国予報中樞に通報する。

この解析には電子計算機システムから出力される各種 HR-FAX の写真並にそれを原図として作成されるループレフィルム、フォールカラー解析用写真及びマルチカラー解析用写真を基本資料として使用される外、電子計算機から出力される雲頂高度、風ベクトル、放射海面水温、雲量分布の各データと ADESS から送られてくる一般気象資料及び JMH の受信資料等が使われる。

また、写真システムに於ては HR-FAX として出力された円形画像、部分画像、ポーラステレオ画像及びメルカトル画像をすべてマイクロフィルムに収め保存する。

写真システムの装置については第Ⅰ-1部 写真システムに於て、また解析については第Ⅱ-2部7章 雲解析に於て詳述されている。

5. 処理 (運用) スケジュールとプロダクト

データ処理システムの処理スケジュールは基本的には衛星の運用スケジュールに依存する。

衛星運用のうちタイムシェアが要求される VISSR 画像取得、FAX 配信及び三点測距の通常のスケジュールを Table 1 に示す。DCP データの収集は一般 DCP (船舶、離島等) が0時に始まる3時間毎の毎正時から30分まで、ASDAR (航空機) については常時可能である。

この通常の運用スケジュールは次の場合に変更される。

5.1 日本附近の異常気象時

台風、集中豪雨及び豪雪等の異常気象時には通常のスケジュールに加えて毎時間の VISSR 画像取得を行い全国予報中樞に HR-FAX を配信する。この追加される VISSR 観測は日本附近の部分画像である。

5.2 オーストラリアの異常気象時

オーストラリア附近にサイクロン等が発生した場合オーストラリアの要請により、その近傍の部分 VISSR 画像を取得して衛星経由で HR-FAX を配信する。これは日豪政府間の交換公文に基づいている。

5.3 衛星の制御時

衛星の軌道（直下点の緯度 $140^{\circ}\text{E}\pm 0.5^{\circ}$ ，緯度 $0^{\circ}\pm 1.0^{\circ}$ ），姿勢（軌道面の法線に対して $\pm 0.5^{\circ}$ ）及びスピンの率（ 100 ± 10 rpm）の保持は NASDA（National Space Development Agency of Japan）が実施する。このために気象庁の運用は約1時間中断され、制御後に軌道、姿勢の再計算を必要とするのでスケジュールに若干の変更が生ずる。通常の精度で軌道姿勢が求まるのに1～2日を要する。現在、制御は1～2ヶ月に1回の頻度で実施されている。

5.4 衛星の障害時及び保守時

衛星に障害が発生した場合直ちにNASDAがその原因究明及び対応措置をするための運用を行なう。またバッテリーのリコンディショニング等衛星の保守のためのNASDAの運用は予めNASDA-JMA間で協議しスケジュールを調整して実施する。

5.5 蝕時

春・秋分の頃の0時(JST)附近で衛星から見て太陽が地球の陰になる時間帯(最長72分)がある。この時間帯では太陽電池からの電力供給がなくなるので、蓄電池によ

る低電力モードでの運用が必要となる。そのためJMAは運用を中断する。また衛星本体の温度低下を来すので推進系燃料の凍結防止のため蝕前、蝕後にヒータをONして温める。この間の一連の運用はNASDAが行なう。この期間は春秋分を含んでそれぞれ約45日である。

5.6 地上施設の障害時及び保守時

JMAの地上施設のうち冗長系をもたない装置の障害の場合運用は中止されNASDAが衛星監視を行う。冗長系をもっているデュアル構成でない装置の障害の場合には切換えて正常に立上るまで運用は中断され、その後スケジュールは一部変更されるが、次の定時VISSR画像以後は通常のスケジュールにもどる。

通常の保守は運用スケジュールに支障のない範囲で実施されるが、大々的な保守の場合運用の中断があり得る。

以上の衛星運用スケジュールに従って取得されるデータは前記の一連の処理を経て出力され配布される。この処理結果の内容、出力時刻及び配布先の一覧表がTable 2に示されている。

1. データ集配信処理

1. Data receipt and distribution system

Abstract

This processing deals with reception and transmission of data to and from various terminals such as GMS, CDAS, TACC, ADESS and JMA. The processing is made by on-line computer and is mostly automatically controlled in accordance with time schedule. However, option is added to the processing so as to make its manual control.

1. 概要

データ集配信処理は DPC (Data Processing Center) 計算機システムのオンライン系計算機システム内に位置し、オンラインで接続される他のサブシステム (CDAS, TACC, ADESS, JMA) と伝送制御プログラムを介して、データの授受を行なう。

データ集配信用のプログラムは入出力データ毎に用意し、各プログラムは時刻管理のもとに自動的に起動あるいはオペレータ管理のもとに手動起動されて、データの集配信を開始し、集配信したデータはデータファイル (磁気ディスク装置) に記憶し、業務処理に供すると共に FAX データを除く全データをジャーナルとして磁気テープに記録する。

入出力データの受渡しは各業務処理プログラムとファイルインターフェイスあるいはメモリー間の転送で行なっている。

入出力データの種類およびそのデータを回線から授受する場合の通信速度、伝送制御手順、データ量等は Table 1 のとおりである。

2. VISSR 集信 (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)

GMS (Geostationary Meteorological Satellite) から伝送されてくる VISSR 画像は CDAS (Command and Data Acquisition Station) で画素毎に 1 スキャン分のデータが一端、蓄積され、ラインストレッチされた

後、伝送フォーマットに整えて、マイクロ回線を介して DPC に伝送されてくる。

VISSR 画像の集信は撮像モード (全球画像、部分画像、特殊画像) に基づいて、ミラー制御をテレメトリ/コマンド処理に依頼して、ミラー制御と同期をとって開始し、120 msec 単位を 1 レコードとして繰り返し伝送されてくるデータ内のドキュメントおよび画像を取得し、ドキュメントのチェックによって正常な赤外画像 (IR) および可視画像 (VIS) をファイルフォーマットに整え、別々のデータファイル (磁気ディスク装置) に記録する。また、画像の集信開始前に指定によって IR か VIS のいずれかの画像のみをデータファイルに記録することが出来る。

データファイルは FAX 画像の作成開始を早めるために、地球画像の半分のデータを記録したところで、ファイル切替えを行ない、後半のデータは別のファイルに記録する。

ただし、部分画像の集信ではファイル切替えは行なわない。また、特殊画像の集信ではドキュメントのチェックを行わずデータをジャーナルとして磁気テープに記録するのみである。

VISSR 画像の集信はミラーが南端から北端に戻ったことを確認して終了する。

3. FAX 配信

VISSR 画像を基にデジタル形式で作成された FAX 画像信号をデータファイル (磁気ディスク装置) からバ

Table 1 Specification of Input/Output Data for Data Receipt and Distribution System.
TRRR stands for Trilateration Range Rate and DCP is Data Collection Platform.

Kinds of data.		Transmission control procedures	Transmission speed	Data generation	Data volume	
CDAS—DPC						
Collecting data	VISSR	No control	0.4 M~1 M bps	14 or 26*/Day	VIS ; 101.5M Byte/Frame IR ; 17M Byte/Frame	
	PCM Telemetry	Request ready	1200 bps	2 Seconds duration	75 Byte/2 Seconds	
	Real time telemetry	Request ready	1200 bps	600 m sec duration	40 Byte/600 msec	
	TRRR	Request ready	1200 bps	4 Times/Day	27 K Byte/Time	
	GMS command journal	Request ready	1200 bps	1 Time/Day	22 Byte/Command	
	CDAS Information	Request ready	1200 bps	5 Seconds duration	55 Byte/5 Seconds	
Disseminating data	HR—FAX	No control	MAX. 21 KHz	14 Times/Day	37.25 M Byte/Frame	
	LR—FAX	No control	MAX. 1685 Hz	8 Times/Day	1.02 M Byte/Frame	
	Command	Request ready	1200 bps	Unschedule	9 Byte/Command	
	S/DB Operating information	Request ready	1200 bps	1 Time/Day	4.84 K Byte	
	DPC Information	Request ready	1200 bps	5 Seconds duration	12 Byte/5 Seconds	
TACC						
collecting data	Orbit forecast	Request ready	2400 bps	Unschedule	400 Byte/1 Time	
	Attitude forecast				100 Byte/1 Time	
	PCM Telemetry				Undefine	
	TRRR			1 Time/Day	108 K Byte	
	GMS command journal				72.8 K Byte	
ADESS					Undefine	
Collecting data	Meteorological observation	Polling/Selecting	2400 bps	Unschedule	About 590 K Byte	
	Administrative message				Undefine	
Disseminating data	Wind			2400 bps	2 Times/Day	7 K Byte/1 Time
	Sea surface				1 Time/10 Days	42.7 K Byte/1 Time
	DCP	8 Times/Day	122 Byte/1 Time			
	Administrative message	Unschedule	Undefine			
JMA						
Disseminating data	HR—FAX	No control	MAX. 21 KHz	31 or 43*/Day	37.25 M Byte/Frame	

* The number of Data generation in case of Extra observation

ッファに読み込み、所定の伝送フォーマットに整えて、指定した回線に送出し、回線に出力する時にアナログ信号に変換する。

データファイルからデータの読み込みが遅れた場合は前ラインの画像信号を回線に送出し、伝送系の装置障害が発生した場合は予備装置に切替えて画像信号の送出を続けるが、位相ずれを起す。

同一の HR-FAX (High Resolution Facsimile) 画像信号は 2 回線の同時送出が可能であり、LR-FAX (Low Resolution Facsimile) 画像信号は 7 分割した画像を連続して送出する。ただし、分割した画像間は 1 分の時間遅延をとっている。

4. 管制データの集信

管制データの集信は PCM (Pulse Code Modulation) テレメトリおよびリアルタイムテレメトリの 2 種類のデータがある。この管制データは一定時間間隔で GMS から伝送されていて、CDAS でデータの発生頻度を単位にテキスト形式に変換して、DPC に伝送される。このデータを 1 テキスト単位あるいは数テキストを集めて 1 データブロックで衛星運用管制業務に渡す。

管制データは一定時間間隔で常時、GMS から伝送されてくるため、CDAS-DPC 間で伝送誤りが発生しても再送は行なわず、常時最新の情報を集信する方式としている。

5. 3点測距/コマンド履歴データの集信

GMS の位置決定を行なう 3 点測距データおよび CDAS で手動で発信した衛星向けのコマンド履歴が CDAS から DPC に伝送される。

このデータを集信すると、1 回線に 2 種類のデータが混在するためデータの識別を行なう。更にテキスト番号の連続性を確認し、正しい場合に限ってデータファイルに記憶する。テキスト番号が連続しない場合はデータの集信を中止し、オペレータとの連絡によって、再送によりデータ集信を再度行なう。

3 点測距データは 1 日 4 回、決った時刻、コマンド履歴データは任意の時刻にデータの集信を行なう。

6. コマンド配信

GMS に対するコマンドおよび CDAS 機器を遠隔制御するためのコマンドフレームを業務処理からの依頼によって、DPC から CDAS に伝送する。

コマンドフレームの配信依頼があると、そのコマンドフレームが数字のみで構成され、禁止コマンドに該当し

ないことを確認して、伝送フォーマットに整えて回線に送出する。回線障害時はその復旧が許容時間内に限って、再配信を行なう。

7. S/DB 運用情報配信

VISSR 画像を集信するためには GMS の制御のほかに CDAS に設置した S/DB (Synchronizer Data Buffer) 装置の制御が必要であり、DPC から直接制御が出来ないため、VISSR 集信前に回線を介して伝送する S/DB 運用情報で制御を行なう。

S/DB 運用情報は通常、1 日単位で作成されて、データファイル (磁気ディスク装置) に記憶される。このデータを 1 テキスト単位に読み出し、テキストを 188 の文字長にブロックキョウして、最初のデータブロックにテキスト番号を付加し CDAS に伝送する。伝送系の障害が発生すると、一端、データの配信を中止して、障害の復旧後、再送する。

8. CDAS との運用情報の集信

衛星の運用を確実に実行するために、CDAS-DPC 間では CDAS および DPC 内の主要な機器状態、および衛星の運用モードを交換する。

8.1 DPC 情報の配信

DPC 情報は DPC 内部の通信制御装置の動作状態および衛星の運用モードを伝送フォーマットに整えて CDAS に伝送する。

回線障害でデータの配信が出来ない時は障害時のデータは破棄し、障害復旧後、最新のデータを配信する。

8.2 CDAS 情報の集信

CDAS 情報は CDAS を構成する各機器の動作状態およびマルチプルコマンドを発信した時の実行回数が一一定時間間隔で DPC に伝送されてくる。

このデータを集信すると、コンソール表示用に編集を行ない、コンソールへ表示依頼を行なう。マルチプルコマンドの発信回数は衛星運用管制業務に渡す。

9. TACC (Tracking and Control Center) とのデータ集信

GMS の管制業務を司る TACC と衛星の管制に必要なデータ交換を行なう。その概要は下記のとおりである。

9.1 データ集信

データ集信はデータが発生した時に、オペレータ間で相互に連絡を行ない、オペレータ起動で集信するデータを指示して行なう。集信したデータはファイルフォーマ

ットに整えてデータファイル（磁気テープ）に記録しデータ“ECD”を検出して集信を終了する。

9.2 データ配信

データ配信はデイリースケジュールあるいはオペレータ起動で開始する。配信するデータの識別を行ない、識別したデータをデータファイル（磁気データ装置）からバッファに読み出し、伝送フォーマットに整えて回線に送出する。

データ配信中に回線障害が発生した場合は、配信を中止し、無条件に配信しているデータを磁気テープ退避させるデータ保存処理を行ない、回線が復旧後、オペレータ起動で、データの再送を行なう。

10. ADESS (Automatic Data Editing and Switching System) とのデータ集配信

国内気象官署および外国気象官署とデータ交換を行なう窓口である ADESS とデータ通信を行なっている。その概要は下記のとおりである。

10.1 データ集信

データ集信は任意の時刻に ADESS からデータが送られてきても開始することが出来るように待機している。

集信したデータはデータ識別を行ない、データ種類毎に別のデータファイルに記録し、気象報はデイリースケジュールに基づいて、規定時間、ファイル上にデータ累積を行なうと、一端、そのファイルをクローズして、ファイル切替えを行ない、別のファイルにデータ累積を行なう。衛星間運用情報は入電すると実時間でコンソールおよびラインプリンターに出力する。電文の抜けは通過番号の確認によって行ない、電文抜けが発生すると再送手続によって、データを集信する。

10.2 データ配信

データ配信はデイリースケジュールあるいはオペレータ起動によって開始する。配信するデータは電文単位にデータファイルからバッファに読み出し、通過番号を付加し、電文をブロッキングして、伝送フォーマットに整えて回線に出力する。回線障害などによって伝送上の誤りが発生するとデータの再送を行なう。

2. 通報局からのデータ収集

2. Data Collection Platform (DCP) Data Editing System

Abstract

The system provides means of communication to remote platforms via satellite, which involves interrogation, transmission of the data observed by the platforms, data collection, editing, and dissemination of the edited data to JMA.

Remote platforms concerned with GMS will be ships, ocean buoys, aircrafts. In addition, ground stations of several countries within GMS range of communication has interest to join the system.

はじめに

DCP (Data Collection platform) は船舶、固定ブイ、航空機などの通報局を対象としている。

通報局のデータ収集業務はディリースケジュールに基づいて、観測指示、呼出、データ集信と編集および集めた観測データの配布を行なう。その概要を次に述べる。

1. 観測指示

観測指示はデータ収集開始時刻の正時の8分前に観測指示コマンドを送出する。観測指示コマンドの形式はグループと個別の2種類があり、前者はデータの収集スケジュールが定時(3H, 6H)の場合であり、後者は臨時にデータを収集する場合である。このコマンドは個々の通報局に対してのみ、3回連続して送る。

2. 呼出

呼出は1日1回、データ収集を行なう通報局を登録した通報局データ収集テーブルに基づいて、呼出型通報局に対して、呼出コマンドを作成し、ディリースケジュール

に基づいて、データ集信に先立ち送る。

呼出はグループ呼出と個別呼出の2種類が可能であり、一回の呼出でデータの収集が出来なかった通報局に対しては全通報局の1回目の呼出が終了後、再度、呼出を行なう。

3. データ集信 / 編集とデータ配布

データの集信 / 編集は呼出型通報局、Self-timed型通報局から送られてくる観測データを時分割で集信する。集信した観測データは通報局単位にコア上に蓄積し、アドレス部のチェック、観測データに付加されたパリティのチェック後、正しい観測データについて、国際気象通報形式にコード変換を行ない、いくつかの観測データをまとめて1つのブリテンに構成し、一端、データファイル(磁気ディスク装置)に記憶する。そのデータの配布は正時の5分 / 30分後に回線(ADESS 経由, GTS 回線)に送る。

通報局のデータフローを Fig. 1 に示した。

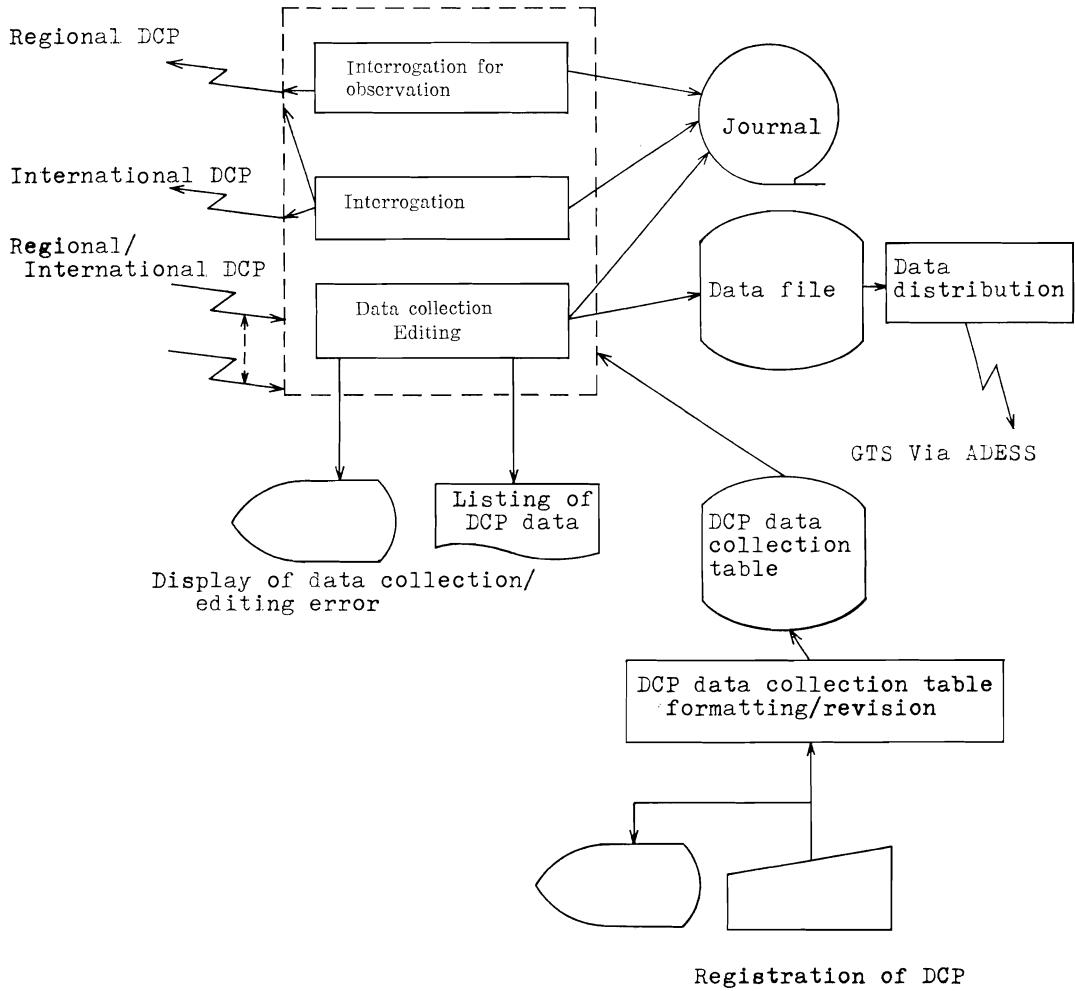


Fig. 1 General Flow of DCP Data Editing.
 GTS stands for Global Telecommunication System.

3. GMS のモニター

3. GMS (Geostationary Meteorological Satellite) Monitoring

Abstract

Sources of telemetry data throughout GMS like temperature, voltage and pressure etc. is sent in pulse code modulated (PCM) serial data stream.

The processing of PCM telemetry data which can monitor housekeeping and status of spacecraft subsystem on real time is called telemetry processing. On the other hand, the term housekeeping processing is meant by the processing of the PCM telemetry data over long time interval and is used for the prediction of the change of conditions in the spacecraft.

In this section, the processing of PCM telemetry data and GMS monitoring are described.

概 要

衛星の状態を示すデータはリアルタイムテレメトリ・データと PCM (Pulse Code Modulation) テレメトリ・データにより地上へ伝送される。このうち姿勢データ及びコマンド関連データはリアルタイム・テレメトリ・データに含まれる。これに対し衛星の状態及び衛星の機器の状態を表わすデータは PCM テレメトリ・データに入る。このうちこの章で対象とするのは PCM テレメトリ・データに限ることとする。PCM テレメトリ・データをリアルタイムに、瞬時のものを処理するものをテレメトリ処理、事後に時間経過を加味しながら処理し、将来の予測に資するために行うものを HK 処理と呼ぶ (House Keeping)。

1. 入出力データ

テレメトリ処理、HK 処理共 PCM テレメトリ・データを基に処理を行う。その際オペレータが関与しなくてもよい通常の処理方式の外に、GOC (GMS Operation Console) から入力されるオペレータの指示を解釈し処理を行う方式がある。結果はテレメトリ処理はディスプレイ (キャラクタ) に、HK 処理はディスプレイ (グラフィック) とライン・プリンターに出力される。

1.1 PCM テレメトリ・データ

PCM テレメトリ・データは衛星の DE (Digital Electronic) サブシステムで Fig. 1 のようにフォーマット化され地上に伝送される。伝送速度は 250 bps なので 1 マイナー・フレームの伝送に約 2 秒、1 メジャー・フレームの伝送に約 2 分を要する。32・33ワードは HK のサブコミと呼ばれメジャー・フレーム毎に更新される。これに対しその他のワードに入るデータは多頻度データと呼ばれマイナー・フレーム毎に更新される。多頻度データは全て HK サブコミ内にも含まれるが、HK サブコミにはサブコミ独自のデータがある。処理の性格により対象とするデータを変える。テレメトリ処理はオペレータが衛星の状態を把握し必要があれば対応処置がとれるよう、データを提供するためのものである。余り短時間にデータを更新してもオペレータは追従出来ない、そこで HK サブコミ・データのみを処理対象とする。一方 HK 処理は衛星のメンテナンス・障害の原因究明及び機器の機能の時間変化又は予測に資するためのものなのでほぼ全データを処理対象としこの累積を行っている。

CDAS (Command and Data Acquisition Station) では受信した PCM テレメトリ・データに受信時刻及びデータの品質の情報を附加し、DPC に伝送する。データ集配信処理はテレメトリ処理に対しては PCM テレメ

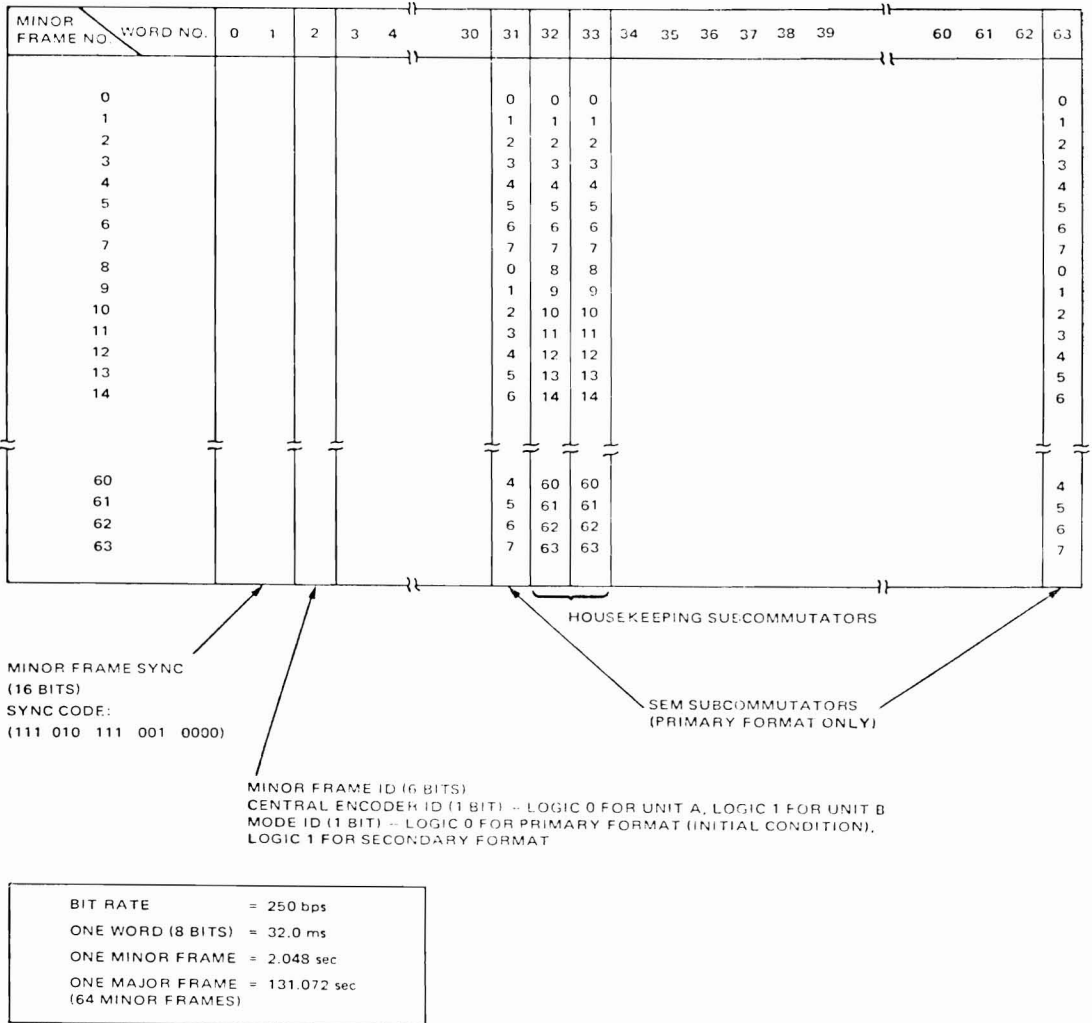


Fig. 1 Format of PCM telemetry data.

トリ・データを1メジャー・フレーム分蓄え、データの品質情報を考慮し必要があれば手を加え、CDASとの回線の情報を附しHKサブコミ・データのみを出力する。一方HK処理に対しては、PCMテレメトリ・データのうちコマンド関連データ及びSEMデータを除いた全てのデータに同じくCDASとの回線の情報を附し出力する。

1.2 GOC 入力のコマンド

PCMテレメトリ・データのうち通常MSC (Meteorological Satellite Center) で監視する必要のないデータを表示してみる場合、又は或る瞬間のデータばかりでなく短時間の変化の傾向を併せて見たい場合、GOCから指示することにより、これらの操作が可能となる。季

節的な変化又は衛星の障害により、リミット・チェックの閾値を越えるような事態になった場合リミット・チェックを中止(再開も可)したり、衛星の機器の障害が発生した場合、その機器が使用出来ないことをコマンド処理に知らせるため、GOCから必要な指示を入力する。

1.3 GOC (グラフィック・ディスプレイ) 入力のコマンド

オンラインのHK処理は殆んどGOCからのオペレータの指示によって進行する。この時、不慣れた者は作業時間は多少かかるがファンクション・キーにより操作を進めることが出来るようになっている。一方熟練者は文字キーを使用し一気に希望する画面を取得することも出来る。

一方バッチでは1月分データを累積した MT (Magnetic Tape) を使用し、カード指示により、項目、時間を指定して XY プロッターに出力する。

2. 使用ファイル

通常 HK 処理が使用する DP (Disk Pack) ファイルは HK ファイル (シングル), HKE (HK Edit) ファイル (ダブル), HKC (HK Copy) ファイル (ダブル) がある。又 MT ファイルには HKS (HK Storage) ファイルがある。ここでは HKE ファイルについて述べる。

2.1 HKE ファイル

HKE ファイルはダブルからなりコントロール・ブロック、デイト・マスター・ブロック、警告 HK ナンバ・ブロック、HKE データ・ブロック、定数データ・ブロックの5つのブロックにより構成される。

コントロール・ブロックには2個のデイト・マスター・ブロックを制御するデータが記録される。2日分あるデータ領域のどちらかを使用しているか、又1日分の HKE データが完成している領域はどれかを完成した時間を附し記録する。デイト・マスター・ブロックにはデータの日付けや HKE データの個数が記録してあり、対応する HKE データ・ブロックを制御する。警告 HK ナンバ・ブロックにはリミット・チェックにかかった項目を記録する。HKE データ・ブロックには1メジャー・フレーム単位に編集された HK データが記録され、最大2日分のデータが収容される。定数データ・ブロックには HK 処理で使用する定数類を記録してある。

3. 処理方式

以下処理方式について、3・1~3・5にテレメトリ処理について記し、3・6~3・8にHK処理に関して記す。

3.1 デコミ処理

データ集配信処理が1メジャーフレーム分の PCM テレメトリ・データをインターフェイス領域に記入し終わった後処理を始める。初めに CDAS との間の回線の状態をチェックした後使用中の衛星のリモート・マルチプレクサを調べ有効なデータだけを選別し「HK データ・テーブル」を作成する。次に有効と判定されたデータのうちアナログ・データを3次式を用い意味のあるデータに変換する。衛星で PCM テレメトリ・データをコード化するセントラル・エンコーダは冗長系を持っている。この両者で変換に際しての特性が違うため、変換係数は両系揃えておき、どちらのユニットを使用しているかを調べ使い分けなければならない。

3.2 衛星内部状態表作成

「HK データ・テーブル」のデータを用い、衛星の各機器単位に使用中、使用可能、使用不可能を決定し「衛星内部状態テーブル」を作成する。又 T/C (Telemetry/Command) コントローラから衛星のモードの情報を得て「衛星内部状態テーブル」に記入する。なお上記コントローラとはプログラムの名である。

3.3 リミット・チェック

集信した PCM テレメトリ・データのアナログ・データに対し該当機器が正常に動作する範囲、又は該当機器が破損せずに作動する範囲のいずれかの上・下限値を与え、機器がその値の範囲内で作動していることをチェックする。もし上下限のいずれかを越えた場合は GOC へメッセージを出力すると共にブザーによりオペレータに知らせる。衛星から見て地球又は月が太陽を隠す蝕が春秋分を中心に年間80日程あり、長いものでは70分に達する。この期間は太陽電池の出力が零となるばかりでなく、各部分の温度が急激に下り衛星にとっては厳しい状況となる。蝕中の監視に万全を期するため、太陽電池の出力をチェックし、通常の半分に落ちた時点で蝕と判断し、リミット・チェックの上・下限値を蝕用のものに切替える。

3.4 編集・表示

PCM テレメトリ・データを GOC へ表示出来るよう、対象テレメトリ・データを「HK データ・テーブル」から抽出し編集する。PCM テレメトリ・データにはアナログ・データ 108, バイト・データ 112 が含まれる。このうちアナログ・データ 78, バイト・データ 93 については常時 GOC に表示する。

3.5 テレメトリ更新

PCM テレメトリ・データのうち通常 MSC で監視する必要のないデータを表示してみる場合、又は或る瞬間のデータばかりでなく短時間の変化の傾向を併せて見たい場合、GOC から指示することにより、これらの操作が可能となる。

3.6 HK 処理のためのデータの準備

テレメトリ処理は瞬間の PCM テレメトリ・データを処理対象とし、古いデータは逐次棄却するのに対し、HK 処理ではより多くのデータを対象としてこれを累積し事後必要が生じた時に時間をかけて解析し、データの時間変化を見ることが出来る。このような条件にあるため、HK 処理ではデータの管理の面でテレメトリ処理とは違ったチェックの方式をとっている。CDAS で附加するデータの品質情報により或る項目が不良データとなると同種の多頻度データから充当する。PCM テレメトリ・

データは全て衛星のリモートマルチプレクサ 8 個のうちのいずれかを經由し、フォーマット化された後地上に送られてくる。衛星が劣化し電源に余裕がなくなると蝕中リモートマルチプレクサの一部を OFF して運用しなければならなくなる。この時リモート・マルチプレクサ自身に関するデータも途絶える。残されたデータから稼働中のリモート・マルチプレクサを判定し、それから更に残ったデータのうちの有効なものを判定することとする。

3.7 HK 処理データの編集

有効と判定したアナログ・データについて 3 次式で物理量に変換する。この時もとのデータがシステム試験で定義された領域をはずれる場合は、伝送上の誤りによって生じた不良データと見做し処理対象からはずす。HK 処理は通常 1 時間に 1 回起動され、前 1 時間のデータについてアナログ・データ、バイト・データ共に各々意味のあるデータに変換されオンラインのファイルに累積される。しかしテレメトリ処理で異常を発見したりして時間経過を見る必要が生じた時は随時 HK 処理を起動し前

回の処理からその時間までの HK データを処理し、HKE ファイルに累積することが出来る。HKE ファイルは 2 日分の HK データを持つことが出来る。尚 1 日 1 回、共用ファイルを通じ 1 日分の HK データをバッチに送り 1 ヶ月分の HK データとして MT に累積する。

3.8 HK の表示

衛星の機器のメンテナンス、又は障害等の原因究明が必要になった場合、HK 処理の出力方式としては下の 3 つがある。1 つはライン・プリンターにマイナー・フレーム毎にデータを打出す方式である。過去 48 時間以内のものであれば SDC からの指示により取得することが出来る。2 つ目は GOC のグラフィック・ディスプレイ上でのグラフ表示である。SDC (Schedule and DCP Console) から HK の手動 / 会話 モードを起動した後 GOC の指示により任意の項目、任意の時間帯 (48 時間以内で時間巾 24 時間以内) についてグラフを得ることが出来る。3 つ目はバッチ系での処理である。HKS ファイルを使用し、カードによって項目、時期を指定し XY プロッターに出力する。

4. コマンド処理

4. Command Processing

Abstract

Most of the commands to operate VISSR, Communications and SEM units are generated by an on-line computer, and is called command processing in our system.

Commands consist of GMS commands and CDAS commands. GMS commands are sent from CDAS to GMS, and CDAS commands are sent from DPC to CDAS.

CDAS commands are used to operate commanding system in CDAS and the units of FAX and TRRR.

This report describes command processings and operation.

概 要

VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer: 可視赤外走査放射計), 通信機器, SEM (Space Environment Monitor: 宇宙環境モニタ) を運用するコマンドは, 大部分計算機により作成され, これをコマンド処理と呼ぶ。

コマンドには, CDAS (Command and Data Acquisition Station: 指令資料収集局 (気象衛星通信所)) から GMS (Geostationary Meteorological Satellite: 静止気象衛星ひまわり) 向けに発する GMS コマンドと, DPC (Data Processing Center: データ処理センター (気象衛星センター)) から CDAS 向けに発する CDAS コマンドがある, CDAS コマンドには, CDAS のコマンド系装置を操作して, GMS コマンドを発するものと, CDAS の FAX (Facimile: ファクシミリ) 装置, 三点測距系装置等を操作するものがある。本文はコマンド処理とその運用について述べる。

1. 入出力データ

コマンド処理の運用のために, 各種の入力データが必要である。また, 発信コマンドをはじめ, 各種の出力データが, コマンド処理の中で作られる。

1.1 PCM テレメトリ・データ

PCM (Pulse Code Modulation: パルス符号変調)

テレメトリ・データは, GMS より CDAS 経由で DPC へ入力され, データ集配信処理経由で, コマンド処理, テレメトリ処理, HK (Housekeeping: ハウスキーピング) 処理, SEM 処理に入力される。

コマンド処理では, PCM テレメトリ・データ中のコマンド・レジスタ・データを, コマンド発信の検証・確認に使用する。

1.2 リアルタイム・テレメトリ・データ

リアルタイム・テレメトリ・データは, PCM と同様, GMS より CDAS 経由で DPC へ入力され, データ集配信処理経由で, テレメトリ処理, コマンド処理に入力される。また, ES センサ・ファイル経由で, 姿勢処理でも使われる。コマンド処理では, リアルタイム・テレメトリ・データ中の, 実行トーン・データを, コマンド発信の確認に使用する。

1.3 CDAS 運用情報

CDAS 情報は, CDAS 機器の状態を, 送信してくるもので, 必要とする CDAS 機器のチェックと, コマンド多重発信時 (同じコマンドのくり返し発信) の回数チェックに使用する。

1.4 GOC 入力のコマンド

GOC (GMS Operating Console: GMS 運用装置) は, テレメトリ・コマンド処理等で使われる, マン・マシン装置であり, コマンド処理では, 発信コマンドの表示の他に, オペレータによる手動コマンドの発信, パラ

メータの指定などが可能である。

入力コマンドには2種類あり、コマンド処理のパラメータ設定等に使われる、オペレータ・コマンドと、GMS運用に直接かかわる擬似コマンドがある。オペレータ・コマンドは“/”ではじまる。擬似コマンドは、コマンド・ファイルで定義された記号そのままであり、手動コマンド処理の時に、オペレータが、直接GMS向けにコマンド発信する時、CDAS機器の操作をする時に使用する。

1.5 GOC 出力データ

GOC中の、コマンド処理の画面は、テレメトリ処理よりのVISSR項目と共に、2枚の画面のうち1枚を構成しており、コマンド処理の状態、コマンド発信の途中経過等が表示される。

タイトル部には、GMS運用モード、コマンド処理ステップの状態等を表示する。

コマンド・シーケンス領域には、実際に発信されているコマンド・シーケンスを表示する。

最下段の検証、確認領域は、コマンド発信時の、コマンド検証、確認の情報が入っている。

オペレータ返答領域は、コマンド・シーケンス領域の右側にあり、手動起動コマンドと定義された時に有効である。

“OK”、“NG”、“ERROR”、“BACK”、“RETRY”の5種類があり、ライトペンで指定でき、検証、確認をオペレータが確認しながら、コマンド発信をおこなう事ができる。

1.6 コマンド配信データ

コマンド・シーケンスの組立は、スケジューラよりの指令、又はオペレータよりの入力により、コマンド処理がおこなう。

そのデータは、コマンド処理と、データ集配信処理では、EBCDICコードで処理するが、ETAM (Extended Telecommunication Access Method: オンライン通信用サブモニタ) が、DPC-CDAS間の伝送フォーマットに変換する。

1.7 コマンド履歴データ

コマンド処理で作成、発信したコマンドは、すべてコマンド履歴ファイルと、ジャーナルファイルに書き込まれる。

その内容は、コマンド発信記録データ、実行確認データ、衛星使用記録データ等よりなる。

2. 使用ファイル

コマンド処理が利用するDPファイルは、コマンド・ファイルとコマンド履歴ファイルの2つであり、いずれもダブル・ファイルである。

コマンド処理が利用するMTファイルは、コマンド・マスター・ファイル、ジャーナル・ファイル、コマンド履歴退避ファイルがある。

本文ではそのうち、DPファイルを中心に述べる。

2.1 コマンド・ファイル

コマンド・ファイルは、ダブル・順編成、定数ファイルであり、コマンド・シーケンスを定義してある。ファイルの中は、いくつかのブロックに分かれている。

コントロール・ブロックは、コマンド・ファイルの先頭にあり、他のブロックを制御する役割をもつ。

衛星定数ブロックは、衛星番号、衛星名、コマンド、デコーダ・アドレスよりなる。

擬似コマンド・テーブル・ブロックは、各レベルの擬似コマンドと、コマンド・シーケンス・ブロックを関係づけるためのブロックである。擬似コマンドは4レベルあり、次の通りである。レベル1は、CDASコマンド・レベル、レベル2は、GMSコマンド・レベル、レベル3は、GMS機器操作レベル、レベル4は、業務マクロ・レベルである。その他、コマンド発信のために展開する、コマンド・シーケンスの情報が入っている。

コマンド・チェック・テーブル・ブロックは、コマンド発信の際の組合せチェック、シーケンス・チェックのための、情報が入っている。

コマンド・ファイルの作成は、コマンド・ファイル編集プログラムにより可能である。

一般的には、カードより、コマンド・マスター・ファイル(MT)をバッチ系計算機で作成し、オンライン系計算機に持ってきて、コマンド・ファイルにコピーする方法がとられる。

コマンド・ファイル障害時は、コマンド・ファイル復旧処理、更新処理が起動され、ファイルを復旧する。

2.2 コマンド履歴ファイル

コマンド処理より出力された、コマンド履歴データは、コマンド履歴ファイルに書き込まれる。現在の運用では、ダブル交代ファイルで、1日に1回切り換わる。ファイルが切り換った時は、コマンド履歴退避ファイル(MT)に、1日分のコマンド履歴データが出力される。

3. 処理方式

コマンド処理は、オンライン系ではコマンド処理、コマンド・ファイル更新処理、コマンド・ファイル復旧処理その他関連処理として、T/C 制御処理、GOC 管理処理等、またバッチ系ではコマンド・ファイル編集処理があるが、本文ではコマンド発信を中心とした処理について述べる。

3.1 コマンド・テーブル初期化

コマンド処理は、コマンド・ファイルより該当するコマンド・シーケンスを読み取り、発信コマンド・テーブルに展開するが、そのために、そのコマンド・テーブルは、あらかじめ運用スケジューラからの起動で、初期化されなければならない。

初期化とは、コマンド処理に必要なコマンド・シーケンス相対位置表と、コマンド・チェック・テーブルを、コマンド・ファイルから読み込み、共通域に展開することである。

3.2 コマンド発信の起動

発信コマンドの指定は、運用スケジューラからは自動サーチ ID により、オペレータからは、GOC 入力 of 擬似コマンド名による。例をあげて、現在使われている「S1 モード解除」について述べれば、

自動サーチ ID.....R10000

擬似コマンド.....RSTS1

となる。

3.3 発信用コマンド作成

スケジューラ、又はオペレータ入力の擬似コマンドにより指定された、コマンド・シーケンスは、T/C コントローラにより、コマンド・ファイル内の相対位置をもとに、読み込む。

コマンド・シーケンス作成のさい、組み合わせチェック・シーケンス・チェックをおこなう。組み合わせチェックとは、特定の衛星運用モードのみ発信できると指定した、GMS コマンドについて、運用モードと合致しているかどうか、チェックするものである。シーケンス・チェックとは、GMS コマンドの中で先だてて発せられなければならないコマンドがある場合、チェックするものである。発信コマンド表中より見つからない場合は、HK データより該当のものを捜して、チェックする。

3.4 コマンド発信

コマンド・シーケンスが展開されると、コマンド発信の段階となる。

(1) タイミング・チェック

VISSR 臨時観測の場合、コマンド発信の際に、ス

キャン・カウントによるタイミング・チェックをおこなう必要がある。すなわち、臨時観測では、特定のスキャン・ライン間の画像撮像をおこなうため、そのスキャン・ラインとコマンド発信の同期が必要だからである。このスキャン・カウントは、VISSR 集信制御処理より、ミラー履歴テーブル経由で得られる。

(2) コントロール DPC のチェック

コマンド発信の前に、CDAS 運用情報により、コントロール DPC であることをチェックする。コントロール DPC、コントロール CDAS は、CDAS のコマンド系装置の制御状態を示し、DPC よりコマンドを発信できるのは、コントロール DPC でなければならない。逆に、もし DPC よりコマンドを発信できないようにするには、コントロール CDAS とすればよい。

(3) 禁止コマンド・チェック

コマンドの中には、間違えて発信すると、GMS に悪影響を及ぼすものがある。そのようなコマンドを間違えて発信しないよう、ガードをかけることを、禁止コマンド・チェックという。

禁止コマンドには、CDAS レベルと DPC レベルがある。CDAS レベルの禁止コマンドは通常使用しない VHF 通信系コマンド等について定義されており、CDAS のコマンド系装置自体でも、ハードウェアで定義されている。DPC レベルの禁止コマンドは、通常のミッション運用に使用しないコマンドについて定義されている。

3.5 検 証

GMS 向けコマンドを発信する場合は、“LTCF”(Load and Transmit Command Frame: コマンド・フレームの格納送出)のパラメータとして発信する。発信されると、CDAS のコマンド系装置に、パラメータとして発信された GMS コマンドが設定され、GMS に送られる。GMS より、PCM テレメトリ・データで、コマンド・レジスタに設定された値が降りてくるので、発信したコマンドと検証する。

この手順により、途中の回線等の影響で、違ったコマンドが、GMS に設定されるのを防ぐ事ができる。

万が一検証できない時は、再試行する。自動コマンド発信処理では、一定回数再試行しても検証がとれない時、又は、テレメトリ回線が異常の時、一定時間後に異常終了する。

3.6 確 認

“LTCF”の発信で、コマンド・レジスタの検証がとれると、“TX (Transmit Execute: 実行信号送信)”を発信する。発信されると、CDAS のコマンド系装置経由で、実行トーンが GMS に発信される。

これにより、GMS 内でコマンドが実行されるが、実行された事は、リアルタイム・テレメトリの実行トーン・データ、PCM テレメトリの実行ステータス・ビットの値、PCM テレメトリの HK データが変化するものは、その変化の様子により判断できる。多重発信の回数は、CDAS 運用情報による。

自動コマンド発信の場合は、リアルタイム・テレメトリ・データで確認し、その回線の異常などで確認できない時は、PCM テレメトリによる。

検証も確認も、オペレータ発信の場合は、GOC のオペレータ・コマンドにより、方法を指定できる。

3.7 履歴作成

DPC より発信したコマンドは、コマンド履歴として、コマンド履歴ファイル、ジャーナル・ファイルに記入される。

3.8 確認処理

コマンド処理が、コマンド発信中などに異常終了した場合、DPC 計算機がシステム・ダウンした場合、手動コマンド発信時のトラブル等で、衛星の状態がわからなくなった場合、また、わかっている場合でも、衛星の状態を確認して、通常の運用にもどす処理をおこなうのが、確認処理である。

確認処理の対象となるものは、ミラーの戻り、業務で操作する衛星搭載機器、CDASの一部の機器である。

(1) CDAS 機器復旧

CDAS 機器のうちで、DPC よりのコマンド発信で、操作されるものが復旧の対象となる。例えば、S3 モードで HR-FAX がオンであれば、オフとする。コマンド・エンコーダは、確認処理の前でオンとし、終了時にオフとする。

(2) ミラー確認

VISSR のミラーが、始点以外にある時は、始点に戻る事を確認する。これは、ミラー履歴テーブルを参照する。その際、ミラーが途中で停止していれば、動かし、正順に動いていれば、逆転させるなどで、始点に戻る時刻を短縮する。

ミラーのスキャン・カウントは、実際値が入ってくれば、始点に戻るまで、スキャン・カウントにより監視をするが、S/DB の障害等で、実際値が入らない時は、取得した実際値をもとに、始点に戻るまで、時刻により監視する。

(3) 衛星状態復旧

衛星の状態の把握は、コマンド実行履歴マスター・テーブルより、そのコマンドが実行されたかどうか、HK データの 2 メジャー分（約 4 分間）より判断し、衛星状態テーブルを作成する。これを元にして、衛星の運用モード解除の状態へ、コマンド発信をする。

5. 宇宙環境モニタ (SEM) サブシステムのデータ処理

5. Space Environment Monitor Data Processing

Abstract

Data processing of Space Environment Monitor Subsystem (SEM) consists of three main parts.

One is data acquisition to SEM file from PCM telemetry by on line system. SEM file is located in A and B system as double files respectively. By Operating System (OS) the SEM file is switched to A or B in daily base.

The second one is daily editing and accumulating data to archive MT from disc pack made by on line system.

Last one is daily conversion accumulated data to physical value and printing and plotting them as two minutes averaged data for quick look use.

Further processing of SEM data for research can be done by user's program using archive MT, which was made from the point of view that the data should be kept as raw as possible.

概 要

宇宙環境モニタ・サブシステムのデータ処理は、主に3つの部分から成り立っている。

第1は、オン・ライン系データ集配信による、SEMファイルへのデータ取得である。SEMファイルはA、B系にそれぞれダブルで用意され、OSの指示で毎日A・B間で切り替えられる。

第2は、オンライン系で作製されたSEMファイル(ディスク・パック)から、データをarchive MT(Magnetic Tape)に編集、累積するルーチンである。

第3として、累積MTを読み、データを物理量に変換して、2分平均値を作り、7日7回ラインプリンタとXYプロッタに出力するルーチンである。

研究用などの、さらに詳しい処理は、archive MTを用い、ユーザのプログラムによりなされる。archive MTは、なるべく加工しない生データの形で保存されている。

1. PCM (Pulse Code Modulation) テレメトリ・フォーマット

SEMデータはPCMテレメトリにより衛星から地上に送られる。このPCMテレメトリ(250 bps)の1メジャフレーム内にSEMが占めるワード位置をFig. 1に示す。

1マイナフレーム(約2秒)に2ワードが与えられているため、P1~ELの全チャンネルの観測に8マイナフレームを要する。(1ワードは8ビット)。従って地上で得られるSEMデータの時系列はFig. 2のようになる。

この他、SEM系のハウスキーピング項目として、センサ温度・回路部温度・電源部温度・回路電圧・センサ逆電流の5項目が1メジャフレームに1回モニタされる。

2. オンライン系処理

オンライン系にSEMファイル(ディスク・パック)がダブルで用意されている。PCMテレメトリデータ集配信プログラムの中のSEMファイル作成タスクにより、PCMデータからSEMデータが抽出され、上のフ

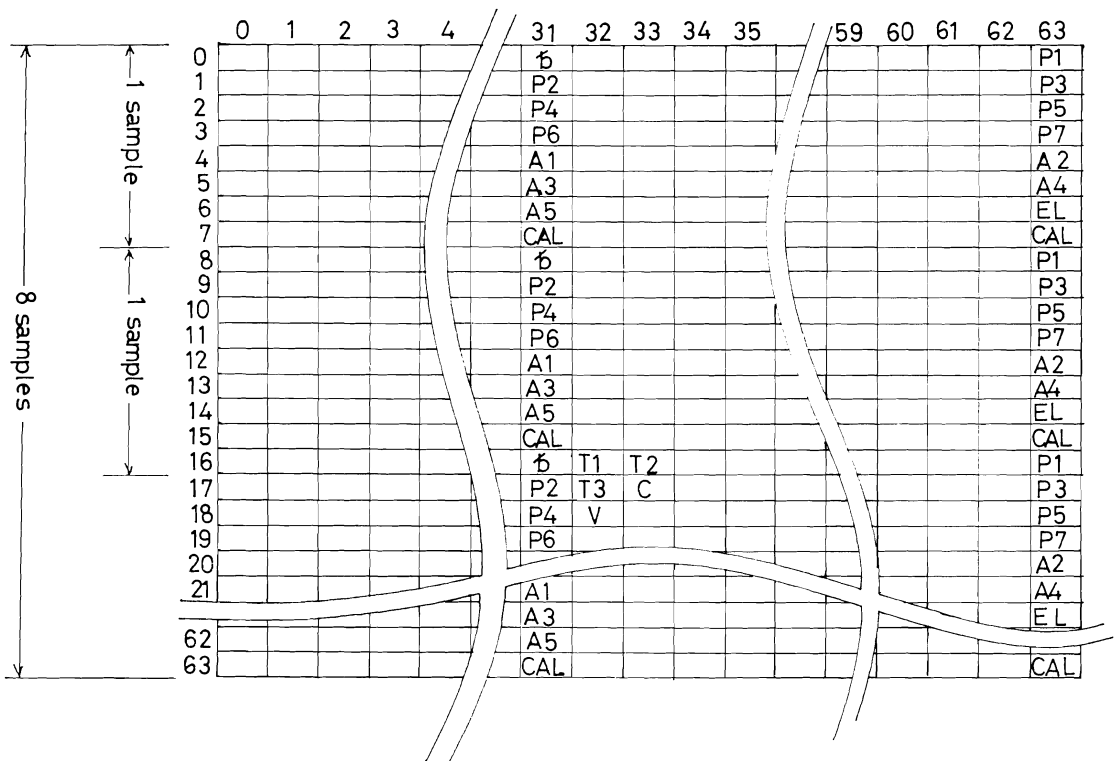


Fig. 1 SEM data position in PCM telemetry format. One SEM sample consists of eight minor frames and eight SEM samples exist in one major frame. Analog data (SEM house keeping data) exist in 32nd and 33rd word once per major frame as shown here.

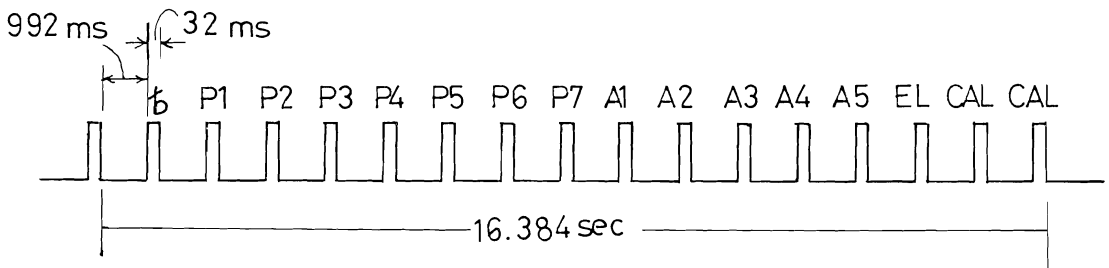


Fig. 2 Time sequence of one sample data. Particle accumulation time of each channel is 992 ms in every 16.384 sec (one sample).

ファイルに書き込まれる。ダブルファイルはA系とB系にそれぞれ用意され、1日ごとにOSM (Operation Scheduling Monitor) の指示によりA・B系間の交替が行われる。

PCM テレメトリデータには、マイナフレームごとにCDAS (Command and Data Acquisition Station)時刻が付いているが、SEM データは8マイナフレームで1サンプルとしての意味を持つので各サンプルの先頭マイナフレームの時刻をそのサンプルの時刻として採用

する。この時、先頭マイナフレームの時刻が回線障害もしくはフレーム抜け等で存在しなかった場合は次のマイナの時刻、それもなければまたその次のマイナの時刻とるように採用する。アナログデータ (SEM のハウスキーピングデータ) の時刻も、正常時は16マイナの時刻であるが、(Fig. 1 参照) 回線障害時には、上と同じ処理がなされる。

書かれるデータは1メジャフレーム (8サンプルとアナログデータ) を1ブロックとし、Fig. 3 に示すよう

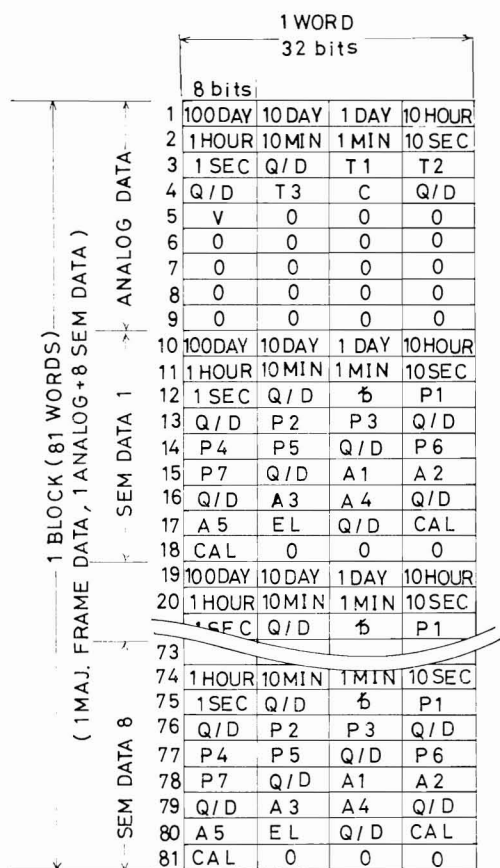


Fig. 3 Format of SEM file (disc pack) by on line data acquisition program.

にならべられる。

フレーム抜けが生じた場合、その次に来た正常マイナのフレーム番号が前の正常マイナのそれより若い場合、次のメジャに移ったものとみなし、前のマイナ以後にダミー（ゼロ）を詰めたメジャデータが作られる。次のメジャについては、先頭からその正常マイナまでの部分に同様にダミーをつけて、1メジャのデータとする。フレーム抜けが生じても次に来た正常マイナのフレーム番号が、その前の正常マイナのそれより大きいときは、その時間差にかかわらず、同一メジャとみなし、その抜けた部分にのみダミーをつめて、1メジャデータが作られる。

1日に発生する総メジャ数は約660であり、一方、SEMファイルの容量は26トラック、896ブロックである。

3. SEMデータの編集・累積処理

3.1 SEM編集・累積プログラムとSEM累積ファイル

オンライン系で作成済みのSEMファイルは、一日単位（通常時、切り替え時刻、0時50分（GMT））で、オンライン系からバッチ系に使用権が移行する。この後、バッチ系のSEM編集・累積プログラムを起動して、SEMデータの編集・累積処理を実行する。

DPC内でのSEMデータの累積過程と、処理結果の流れについて、Fig. 4に示す。

SEMデータ編集処理は、SEMファイルにPCMテレメトリ・データイメージ（8ビット/1語）で記録されているデータを解釈、編集して、SEM累積用中間ファイル（作業用ディスクバック）に、編集済みSEMデータとして書き込む。

また、SEM累積処理は、SEM累積用中間ファイルを読み、保存用磁気テープに、編集済みSEMデータを、ファイルを拡張する形で累積し、SEM累積ファイル（1ボリューム、1ファイル、1巻=60日分）を作成する。

3.2 SEM累積ファイルの構成と書式

SEM累積ファイルは永久保存用の磁気テープにおさめられている。このファイルの複写された磁気テープが、太陽-地球間物理的調査・研究のために利用者に提供される。

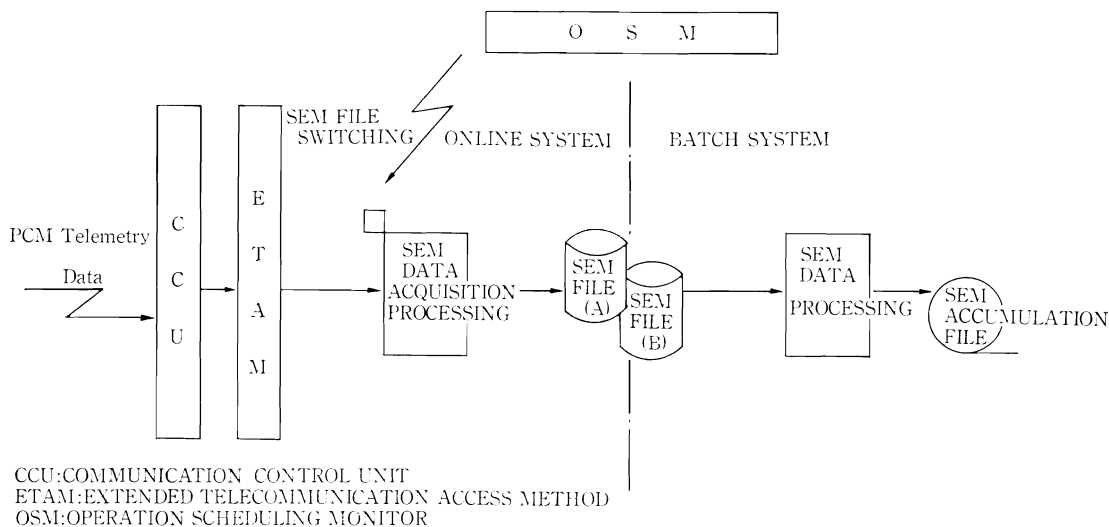
SEM累積ファイルの概要と、詳細書式と内容は、それぞれ、Table 1, Table 2(a), Table 2(b)に示す。

4. 2分平均値作製・プロット処理

前節で作られた生データを読み、2分平均値を作製して、全チャンネルを1日を単位としてXYプロッターに出力する。この概略フローは前出のFig. 4を参照され

Table 1 General Description of SEM Accumulation Tape.

SEM Accumulation Tape (SEM Archival Tape)
General description of the archival tape:
Tape Density...1600/6250 bpi (9 Track)
Word size...32 bits
Block size...828 bytes
Record size...828 bytes
Blocking factor...1
Code...binary (Except 1 words (EBCDIC))
Data terminator...No EOF
Tape terminator...Two consecutive EOFs
Words per 9 samples...207



FLOW DIAGRAM OF SEM DATA PROCESSING

Fig. 4 Flow diagram of SEM data processing

Table 2(a) Record 1, Documentation Data Format and Content of SEM Accumulation Tape.

Record 1, Documentation Data
(207 32 bit words)

Words	Description
1.....	Record ID code (EBCDIC) '0001'
2.....	" " " '0000'
3.....	8 Zero
9.....	Dummy
10.....	Year, 2 digits, GMT of data start of the Day
11.....	Month, 2 digits, GMT of data start of the Day
12.....	Day, 2 digits, GMT of data start of the Day
13.....	Number of blocks of accumulated data of the Day EBCDIC 4 characters
14.....	16 Zero
17.....	Year, 2 digits, GMT of accumulation data start of the Day
18.....	Month, 2 digits, GMT of accumulation data start of the Day
19.....	Day, 2 digits, GMT of accumulation data start of the Day
20.....	Hour, 2 digits, GMT of accumulation data start of the Day
21.....	Minute, 2 digits, GMT of accumulation data start of the Day
22.....	Second, 2 digits, GMT of accumulation data start of the Day
23.....	Year, 2 digits, GMT of accumulation data end of the Day
24.....	Month, 2 digits, GMT of accumulation data end of the Day
25.....	Day, 2 digits, GMT of accumulation data end of the Day
26.....	Hour, 2 digits, GMT of accumulation data end of the Day
27.....	Minute, 2 digits, GMT of accumulation data end of the Day
28.....	207 Blanks

Table 2(b) Record 2—900, Analogue/SEM Data Format and Content of SEM Accumulation Tape.
Record 2, Analogue/SEM Data
(207 32-bit words)

Words	Description
1.....	Year, 2 digits, GMT of analogue data acquisition
2.....	Blank
3.....	Month, 2 digits, GMT of analogue data acquisition
4.....	Day, 2 digits, GMT of analogue data acquisition
5.....	Hour, 2 digits, GMT of analogue data acquisition
6.....	Minute, 2 digits, GMT of analogue data acquisition
7.....	Second, 2 digits GMT of analogue data acquisition
8.....	Detector Temperature
9.....	Circuit Temperature
10.....	Power Unit Temperature
11.....	Voltage Monitor
12.....	Current Monitor
13.....	23 Dummy data
24.....	Year, 2 digits, GMT of SEM data acquisition
25.....	Blank
26.....	Month, 2 digits, GMT of SEM data acquisition
27.....	Day, 2 digits, GMT of SEM data acquisition
28.....	Hour, 2 digits, GMT of SEM data acquisition
29.....	Minute, 2 digits, GMT of SEM data acquisition
30.....	Second, 2 digits, GMT of SEM data acquisition
31.....	blank
32.....	P1 channel, $1.2 \leq E_p \leq 4$ MeV (protons)
33.....	P2 channel, $4 \leq E_p \leq 8$ MeV (protons)
34.....	P3 channel, $8 \leq E_p \leq 16$ MeV (protons)
35.....	P4 channel, $16 \leq E_p \leq 34$ MeV (protons)
36.....	P5 channel, $34 \leq E_p \leq 80$ MeV (protons)
37.....	P6 channel, $80 \leq E_p \leq 200$ MeV (protons)
38.....	P7 channel, $200 \leq E_p \leq 500$ MeV (protons)
39.....	A1 channel, $9 \leq E_p \leq 90$ MeV (alpha particles)
40.....	A2 channel, $30 \leq E_p \leq 70$ MeV (alpha particles)
41.....	A3 channel, $65 \leq E_p \leq 170$ MeV (alpha particles)
42.....	A4 channel, $130 \leq E_p \leq 250$ MeV (alpha particles)
43.....	A5 channel, $320 \leq E_p \leq 370$ MeV (alpha particles)
44.....	Ele. channel, $2 \geq E_e$ MeV (electrons)
45.....	Cal. channel, SEM Unit Calibration Data
46.....	Cal. channel, SEM Unit Calibration Data

たい。

4.1 対象日付の作製

オペレータによる入力ミスを避けるため、処理すべきデータの日付けとして、ジョブを実行する時刻の日付けを読み、これの1日前の日付けを求めて、処理対象日付とする。前節の累積ルーチンは、オンライン系集信の日界(0050Z)ごとのデータを累積する。従ってデイトマ

スタごとのプロットでは1日単位にならないので、上の方法で求めた日付けに属する、すべてのデータを処理対象とする。

4.2 2分平均値の作製

各チャンネルごとに、1メジャフレーム(約136秒)中の8サンプルの平均値を、ここでは2分平均値と呼ぶ。まず累積MTの先頭ブロックの先頭時刻を順次読み、

対象日付けより古い場合は読みとばし、対象日付けに属するデータを処理対象とする。この時刻が対象日付けより新しいか EOF を検出するかすれば、処理を終る。

処理すべきデータが見つかり、まず第1サンプルの SEM データをみて、すべて 255 以下であることを確かめる。そうでない場合は、次のサンプルで同様な作業をくり返す。データがすべて 255 以下である最初のサンプル (第1有効サンプルと呼ぶ) の時刻をこの 2 分値の時刻として採用する。次に、すべての有効サンプルについて、各チャンネルにつき、生データからコンプレッションによる真の入力値に変換する。この場合、出力値 (0~255) に対し、入力カウント数 (0~65143) は一対一には対応しないが、入力値として中心値をとる。たとえば、テレメトリ出力値が50の場合、真の入力値は408から423の間にあることしか解らないが、この場合、中心値 415.5 を入力値として採用する。このようにして決めた中心値に、次項で述べるビットエラー補正を施し、全有効サンプル (正常時は 8 サンプル) にわたって、平均値を求める。この値を幾何学的要素と観測時間で割り、そのチャンネルのフラックスとする。

4.3 ビット化け補正

テレメトリデータには一般に、Q/D (データの内容) が正常であってまれに、ビット化けによると思われるとび離れたデータが存在することがある。これはプロットした場合に鋭いスパイクとして表れるので、このようなデータは除くのがのぞましい。そこで前項で述べた 2 分値作製時に、次のような補正を行う。

1 メジャフレームの全有効サンプルの中心値を出した時点で、ひとつひとつのチャンネルにつき、8 サンプルのうちの最大値を求める。次に、この最大値を除いた他のサンプルの平均値を求め、最大値がこの平均値のある倍数よりも大きいときは、これをビット化けによるエラーとみなし、処理対象からははずす。現在、このファクタは 5 としているが、可変パラメータとして、いつでも変えることができる。ビットエラーにより、値が特に小さくなった場合は、全サンプルの平均値をとってもさほど変わらないので無視する。上のようなビットエラーの定義では、8 サンプルのうち、7 サンプルかゼロで 1 サンプルが 1 や 2 の場合もエラーとみなされてしまうが、これは正しくない。ゆえに、最大値のカウント数がある値より小さい場合は、エラー処理をしないことにする。この値も可変で、自由に変えられる。また、生データを見るべきで、エラー処理を施したくないという場合は、この値に 999.9 を指定すれば、このエラー処理ルーチン自体をスキップするようになっている。

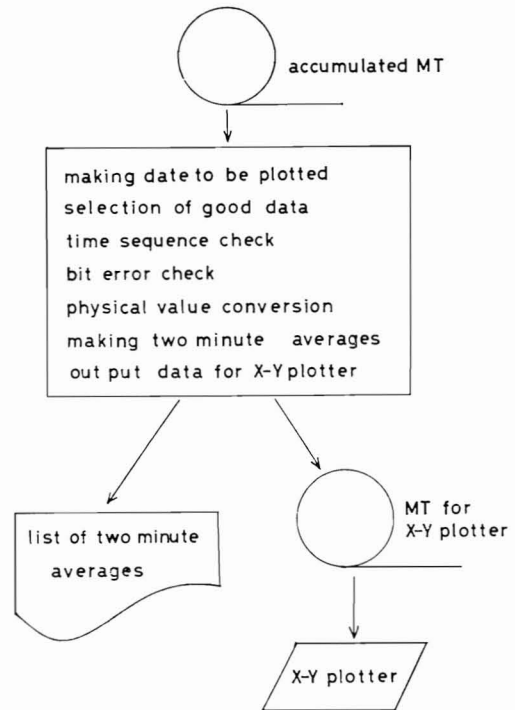


Fig. 5 Scheme of two minute average data making and plotting process.

こうして求めた 2 分値を、ラインプリンタ 1 行に出力する。

4.4 時刻シーケンス・チェック

システムダウン時に累積ルーチンが 1 日に 2 度以上走った場合、古いデータが累積されることがある。これを除くため、2 分値作製時に、ひとつひとつのデータの時刻についてシーケンスをチェックし、時間的に逆転したデータは処理しない。

4.5 プロット処理

以上のようにして選ばれた 2 分平均値 (対象とする日に属するもの、サンプルにわたってすべての Q/D が良好なもの、ビットエラー補正を受けたもの、時間的に逆転していないもの) のうち、さらに次の場合を除いたデータをプロッタに出力する。

- キャリブレーション時のデータ
- SEM 電源 OFF の場合。電源電圧をみて、これが 0 の場合、SEM-OFF とみなしてプロットしない。

プロットしない場合は品質が不良などと同様に欠測とみなし、点線とする。欠測のない正常データ間は実線でつなぐ。

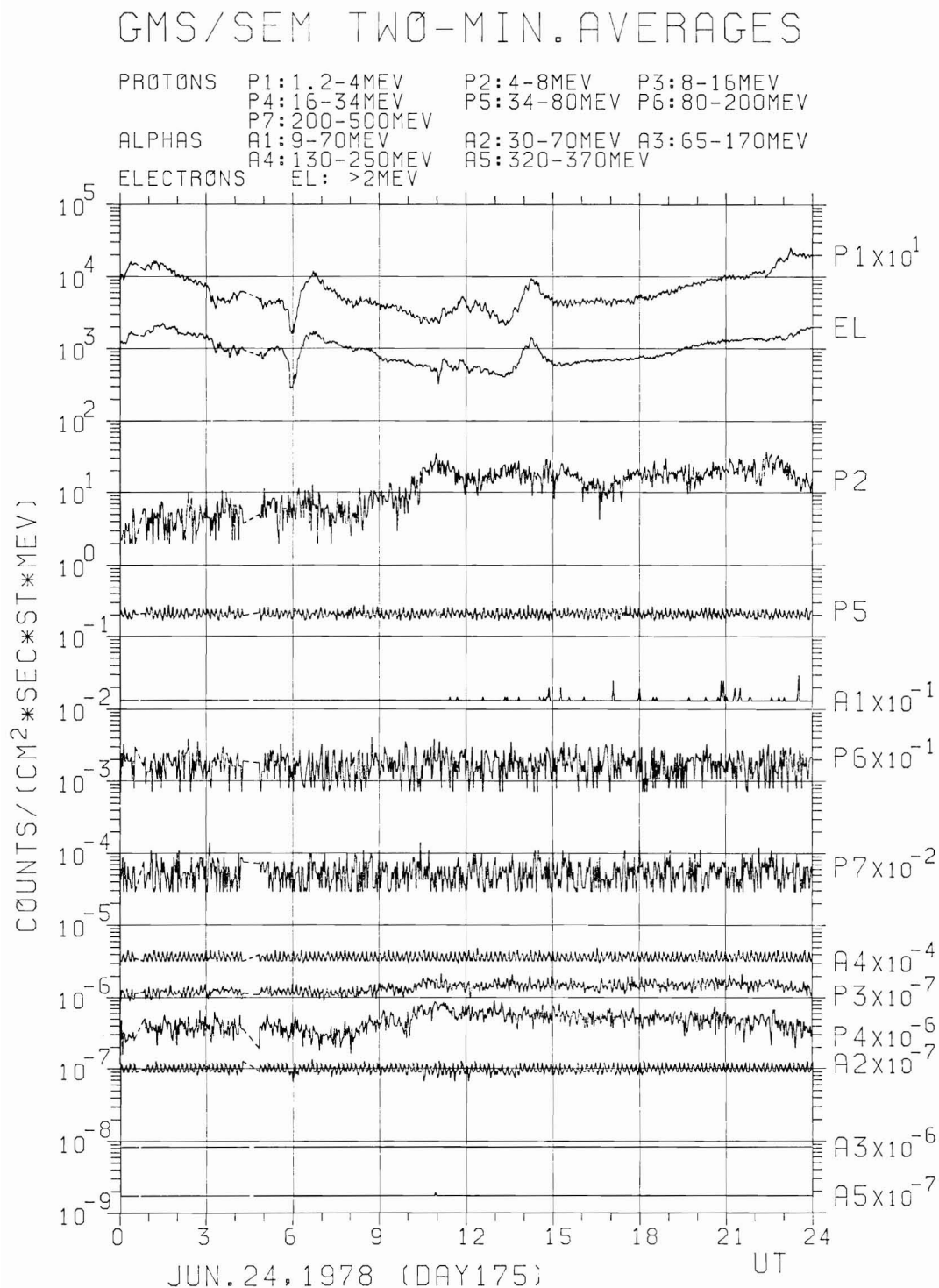


Fig. 6 An example of plotter out put. Channel P2 is in increase phase due to a solar flare.

また、クイックルックのために全チャンネルを一枚にプロットするので、データ間の重なりを避けるため、チャンネルごとにオフセット値を設け、ケタをずらせる。このオフセット値も可変で、必要となればデータカードで変えられる。このプロット結果の一例を Fig. 6 に示す。

4.6 2分値の時刻について

すでに述べたように、この2分値の時刻としては、第1有効サンプルの第1マイナフレームにつけられた

CDAS タイムを採用している。このため、真の時刻より、多少早めの時刻となっている。その差はチャンネルによって異なり、P1 が真の時刻に最も近く、EL が最も離れている。たとえば、P1 の場合採用された時刻を t とすると、 $t+175$ 秒を中心として ± 1 分の平均値となる。EL の場合、 $t+87$ 秒である。他のチャンネルはこの間に入る。

6. 軌道データ処理

6. The Orbit Determination and Prediction System

Abstract

The orbital determination and prediction program utilizes the simultaneous slant range data from 3 stations to determine the orbit of the satellite.

The program consists of the Trilateration Range and Range Rate (TRRR) data editing, pre-processing of the TRRR data, the orbital determination and prediction, ephemeris data preparation, and display of orbit and attitude elements on the graphic display.

The satellite position and velocity are estimated by the statistical decision procedure using Bayesian Weighted Least Squares Method. The influence of nonsphericity of gravitational potential, lunar and solar gravitation and solar radiation pressure are taken into account in the equation of motion of the satellite.

The orbital determination and prediction are processed routinely once a day.

The determined and predicted orbit elements are provided to the attitude and the Visible and Infrared Spin Scan Radiometer (VISSR) image data processing.

概 要

軌道データ処理は、TRRR (Trilateration Range and Range Rate) データの編集、データの前処理、軌道決定・予測、天体歴データの作成、衛星の位置および姿勢要素の表示の各プログラムにより構成される。

軌道の推定は、統計的決定方式により、ベイズの重みつき最小2乗法を用いて行う。この際、摂動力として、地球の重力ポテンシャル、月、太陽の引力を考慮し、特別摂動法により運動方程式を解く。

偏微分係数は、変分方程式を積分することにより求める。

これらのデータ処理は毎日行われ、姿勢、画像データ処理に送られる。

1. 観測データ

衛星から地球画像を取得し、その画像を解析するためには、衛星の正確な位置が必要である。

衛星の軌道を決定するために、気象衛星通信所 (Command and Data Acquisition Station, CDAS) を主測

距局 (Master Ranging Station, MRS) として、測距局 (Turn-around Ranging Station, TARS1, TARS2) を用いて、測距局から衛星までの距離を同時に測定し、更に MRS から衛星への仰角 (elevation)、方位角 (azimuth) も測定する。距離データをもとに、CDAS では距離変化率を計算する。これらのデータを総称して三点測距 (Trilateration Range and Range Rate, TRRR) データという。

通常1日4回6時間間隔で測距を行い、1回の観測で1秒ごとに7分間計420個の TRRR データが得られる。TRRR データは CDAS から DPC (Data Processing Center) にオンラインで送られて、データ集配信処理により共用ファイルに蓄えられる。1日1回共用ファイルの TRRR データをバッチ系にある TRRR 累積ファイルに書くと同時に、データの JIS コードから EBCDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code) への変換、フォーマット変換、品質チェックを行い、データを時刻の降順に並べかえる。この TRRR 累積ファイルには、最新3日間または最大15回分のデータが累積され、毎日衛星の位置、速度を推定するために

利用される。

2. 測距局位置

地上の測距局位置を決定する場合、地球の実際の形は非常に不規則であるから、計算を簡単にし、しかも測量する区域のどこでも、結果に重大な誤差を起さない程度に、十分真の形に近い数学的な形を選ぶ必要がある。このような形として、現在測地学で用いられている形は、楕円を短軸のまわりに回転させた時にできる形、すなわち、回転楕円体 (準拋楕円体) である。

この準拋楕円体は、各国によって異なり、日本では F. W. Bessel (1784-1846) が 1841 年に定めたベッセル楕円体により、赤道半径 6377.397 km, 極半径 6356.097 km, 扁率 1/299.15 を採用している。

ところが、近年、測地衛星 (GEOS-1) のデータを用いて、スミソニアン天文台ではより正しい値として、赤道半径 6378.142 ± 0.006 km, 極半径 6356.757 km, 扁率 $1/(298.255 \pm 0.005)$ と定義した。

この結果、日本測地原点の位置は、北西方向に約 500 m ずれていることがわかった。

宇宙開発事業団 (NASDA) の諸設備のうち、位置が世界的にみて問題になるものについては、スミソニアン天文台決定の「標準地球モデル C7 系」(the Standard Earth C7 Coordinates system-1967) に変換した値を用いることに定めた。

気象衛星センターでは、測距局位置の各地測地系から C7 系への変換を、海上保安庁水路部に依頼して、次のように定義することにした。なお下記の () 内は現地測地系による測量結果である。当然のことであるが、現在用いられている地図上での位置関係は、現地測地系に準拠する。

主測距局 (MRS) 埼玉県鳩山村

北緯 $35^{\circ}58'27.66$ ($35^{\circ}58'15.8725$)
東経 $139^{\circ}18'57.28$ ($139^{\circ}19'09.0784$)
高さ 169.6 m (131.945 m)

測距局 (TARS1) 石垣市

北緯 $24^{\circ}20'13.37$ ($24^{\circ}20'27.158$)
東経 $124^{\circ}09'49.17$ ($124^{\circ}08'49.371$)
高さ 37.6 m (5.26 m)

測距局 (TARS2) Orroral Valley, Australia

南緯 $35^{\circ}37'34.24$ ($35^{\circ}37'37.594$)
東経 $148^{\circ}57'14.65$ ($148^{\circ}57'11.622$)
高さ 957.1 m (933.626 m)

3. 前処理

一般に、観測データには誤差が含まれており、そのまま計算に用いた場合、精度上問題を生じる。そこで、本システムでは次のようなデータ補正を行っている。

3.1 データの平滑化

不良データを棄却するために、観測データ 30 サンプルごとに 3 次のチェビシェフ多項式 (Chebysev's polynomial) により最小 2 乗近似して標準偏差 σ を推定する。30 サンプルの中間の 10 サンプルに対して、観測値との偏差が 3σ 以上のデータを不良データと見なして棄却する。以下、10 サンプルずつ移動させて同様の処理をくり返す。

3.2 対流圏 (Troposphere) における屈折補正

電波や光は、大気や電離層によって屈折をうけ、観測から得られた値と実際の値とは異なる。

対流圏における屈折率 n は一般に次の式で表される。

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (1)$$

ここで、 N は Refractivity と呼ばれる量で、次式に従っている。

$$N = \frac{a}{T} \left(p + \frac{be}{T} \right) \quad (2)$$

ここで、 T は地上局における気温 ($^{\circ}\text{K}$)、 P は気圧 (mb)、 e は水蒸気圧 (mb)、Smith & Weintraub (1952) の定数として、 $a = 77.6^{\circ}\text{K}/\text{mb}$ 、 $b = 4810^{\circ}\text{K}$ を用いている。

補正量は、対流圏の屈折率分布モデルを設定して、地表面屈折率と衛星の仰角との関係により求められる。

3.3 電離層 (Ionosphere) における屈折補正

観測局の緯度補正係数 f_L は

$$f_L = \exp(0.693 - 0.0154\varphi) \quad (3)$$

で表される。

ここで φ は緯度 (rad.) を表す。

又、赤道における正午の総エレクトロン含有量 NT は

$$NT = a[1 - b(R_z - 40)] \times 10^7 \quad (4)$$

ここで、 a 、 b は季節的に変動する項で、表で与えられる。 R_z はウォルフ黒点数である。

これらの定数を用いて、電離層による補正量は次式から求められる。

$$\Delta\rho = \frac{1600 \times Q \cdot NT \cdot f_L \cdot F}{W^2} \quad (5)$$

ここで、 Q は衛星の仰角により変動する項、 F は時間により変動する項で、いずれも数表で与えられる。

3.4 時刻データの補正

MRS と衛星の距離を r 、光速を c とすると、補正量 ΔT は $\Delta T = r/c$ となる。

4. 座 標 系

衛星の運動を記述するために、衛星の位置と速度を表現する方法として、任意の点を原点とした3次元直交座標系によるものと、瞬間的な楕円運動を軌道面で考え、刻々の楕円軌道の要素（これを接軌道（osculating elements）という）で表したものとがある。後に述べるが、いずれも6つの要素で軌道は決定する。

前者のうち、本システムで用いるものは、次のようなものである。

1つは慣性座標系（inertial coordinate system）で、原点を地球の中心とし、 x 軸は春分点（vernal equinox）の方向にとり、 y 軸は赤道面の中で90度だけ東の方向に進ませた方向にとる。 z 軸は右手系による。この x 軸方向を規定する春分点は、才差（precession）によって、地球の平均的回転軸は26000年で黄道の軸のまわりを1回転し、章動（nutation）によって、地球の真の回転軸は地球の平均的回転軸のまわりを18.6年で1周するために、この基準点は変動する。これらの原因は、地球が完全な球ではなく扁平な回転楕円体に近い形であり、その回転軸が黄道面に対して垂直でないために、他の天体からの引力が不均等に受けることにより生ずるものである。ここで、才差のみを考慮した春分点を平均春分点という。運動方程式の解析には基準点を1950.0年の平均春分点と定義した慣性座標系を用いることにした。更に、章動までを考慮した春分点を真の春分点といい、刻々の衛星の運動の加速度計算は、真の春分点方向を x 軸とする慣性座標系を用い、回転行列により、相互変換を行うことにした。

もう1つの座標系は、地球固定座標系（earth-fixed coordinate system）と呼ばれるもので、原点を地球の中心とし、 x 軸はグリニッジ子午線の方向にとり、 y 軸、 z 軸は慣性座標系と同じように定義する。この座標系は、衛星の運動を観測局のデータと結びつけたり、後に述べる地球の重力ポテンシャルによる衛星の加速度計算に用いられる。

この他に測地学的座標系（geodetic coordinate system）があり、これは、観測局位置、衛星直下点位置を定義するために用いられる。

5. 時 系

時間の単位（秒）は物理量の基本単位の1つであるが、本システムでは扱う物理量の性質により、地球の回転時角の計算に UT1、運動方程式の数値積分に TAI、入出力には UTC を用いて相互変換を行っている。以下に時系の定義を述べる。

1つは天文時系の秒の定義で、国際天文連合（International Astronomical Union, IAU）の決定にもとづき、世界時又は自転時（Universal Time, UT）と呼ばれる時系を設定した。UT は地球自転に立脚した時刻で更に次の3種類に別れる。

UT0：天文観測から直接得られる本初午線の平均太陽時。

UT1：UT0 に地球の回転軸変動（極運動）の補正をしたもので、回転時角に直接対応する。

UT2：UT1 に自転の季節変動の補正をしたもの。

なお、グリニッジ時（Greenwich Mean Time, GMT）と UT は同じものである。

次に、もう1つの秒の定義は、原子がそれぞれ特有の振動数の電磁波エネルギーを吸収したり、放出したりする性質を用いた原子時系で、1967年第13回国際度量衡総会（CGPM）において、「秒はセシウム133原子の基底状態における2つの超微細構造間の遷移エネルギーの振動周期の9192631770倍とする。」と決議され、1971年第14回CGPMでは、この秒の定義にもとづいて、国際原子時（International Atomic Time, TAI）が設定された。世界各地の原子時計はパリの国際報時局（Bureau International de l'Heure, BIH）で統一を図っている。この時系の原点は1958年1月1日0時0分0秒とし、UT2と同時に出発した。物理的な運動の記述には、この一様な流れをもつ TAI が適当である。現在、われわれが日常用いる時系は、BIHによって保たれる時間目盛で、正確に TAI と同一であるが、TAI から秒の整数倍異なる協定世界時（Universal Time Coordinated, UTC）と呼ばれるものである。UTC は、UT1からの偏差が ± 0.9 秒を超えないよう、うるう秒による調整が行われている。

本システムでは、東京天文台からBIH月報（Circular D）の送付を受け、天体暦データを作成し、UTC, UT1, TAI 間の補正を行っている。

入力データは TAI-UTC, TAI-UT1, 極運動 (x, y) の値である。TAI-UTC は、観測データと運動方程式の間の時刻の変換に用いられる。TAI-UT1 は、慣性座標系と地球固定座標系の変換に用いられ、春分点方向と g

リニッチ子午線方向とのなす角 θ_g が求められる。ところが、地球固定座標系の z 軸方向、即ち極点は半径15mほどの楕円に近い、しかし複雑な軌道をえがいて動き回るため、刻々の地球固定座標系は極運動 (x, y) データにより補正して定義する必要がある。

なお、1979年1月1日現在、TAI-UTC=18.0 sec, 1979年2月5日の TAI-UT1=17.5055 sec, $x=0.^{\circ}064$, $y=0.^{\circ}052$ である。

6. Kepler の軌道要素

衛星の軌道を視覚的に表現するものとして、古典的なパラメータで普通6つの Kepler の軌道要素 (Kepler's orbital elements) と呼ばれるものがある。

これらのうちの2つは楕円の大きさと形を定義するもので、長半軸 (semimajor axis) a と離心率 (eccentricity) e である。次の2つは軌道面を定義するもので、軌道傾斜角 (orbital inclination) i と昇交点経度 (longitude of the ascending node) Ω である。 i は赤道面と軌道面のなす角で両者の交線に垂直な面の中で測られる。 Ω は春分点方向 γ と、衛星が南から北へ赤道面を通過するときの赤道面と軌道面の交線のなす角である。次に楕円の長軸の方向を定義するものとして近地点引数 (argument of perigee) ω がある。 ω は Ω が定義された直線から地球の中心と近地点を結ぶ直線ま

で、軌道面の中で測られた角である。最後の要素は平均近点離角 (mean anomaly) M である。衛星の平均角速度を n , 近地点通過時刻 (time of perifocal passage) を T , 基準時刻 (epoch time) を t_0 とすると、

$$M = n(t_0 - T) \tag{6}$$

で表される。

これらの古典的パラメータ

$$[a, e, i, \Omega, \omega, M]_{t=t_0}$$

を通常軌道6要素という。

7. 推定理論

古典確率論の組織大成に大きく貢献した T. Bayes による次のような Bayes の定理がある。

今、 n 個の互いに排反する事象 E_1, E_2, \dots, E_n があって、かつその中の1つは必ず起こるものとする。 E を別の確率事象とすると、一般に

$$P(E_i|E) = \frac{P(E_i)P(E|E_i)}{P(E_1)P(E|E_1) + \dots + P(E_n)P(E|E_n)} \tag{7}$$

が成立する。

ここに、 $P(E_i)$ は E_i の起こる確率、 $P(E_i|E)$ は E が起こるとい条件の下に E_i の起こる条件つき確率を

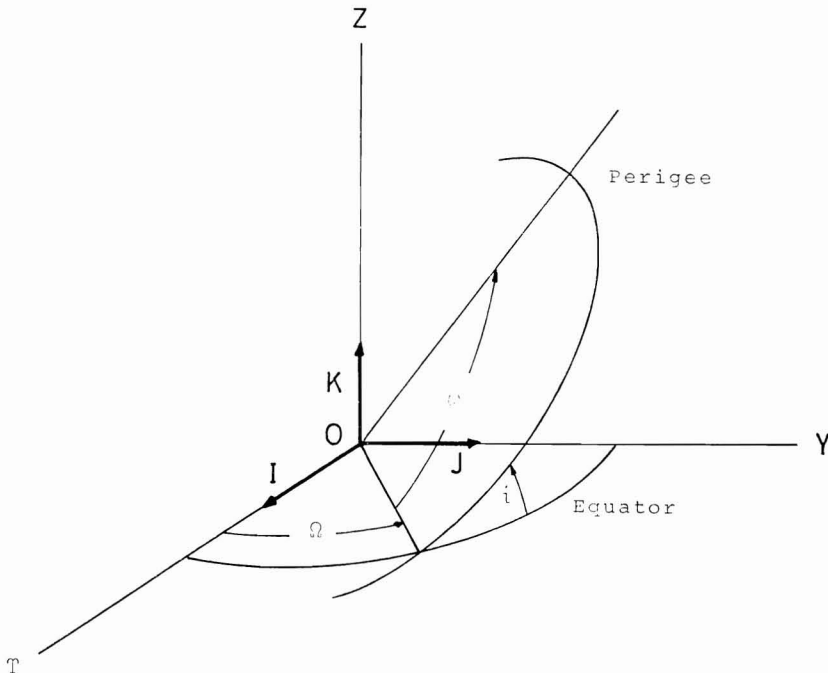


Fig. 1 Unit vectors in the inertial coordinate system and the orbital elements.

表す。 $P(E_i)$ を事前確率 (a priori probability), $P(E_i|E)$ を事後確率 (a posteriori probability) という。

この定理は、もし結果 E が起こったことを知ったならば、すべての原因 E_i について、その事後確率 $P(E_i|E)$ を計算し、それらを比較してその値が最大となる E_i^* が原因であったと統計的に推論をすることを暗示している。

今、衛星の観測方程式を次のように定義する。

$$E_i = f(E) + \alpha_i \quad (8)$$

ここで、 E_i は n 次元観測ベクトル、 E は m 次元未知パラメータベクトル、 α_i は n 次元誤差ベクトル、 f は n 次元観測関数ベクトル、また α_i の各要素は E_i の各要素と対応するものとする。Bayes の定理を用いて、 E_i が起ったときこれが原因 E により起ったとみる確率は、

$$P(E|E_i) = \frac{[P(E_1)P(E|E_1) + \dots + P(E_n)P(E|E_n)]P(E_i|E)}{P(E_i)} \quad (9)$$

で表すことが出来、観測データの集合 E_i が得られたとき、最小 2 乗法を用いて上式を最大にするような E の推定値 \hat{E} を求めることを試みる。

E が与えられたとき、 E_i の起こる確率は $E_i - f(E)$ の起こる確率に等しいと考える。又、 α_i は平均 0 の正規分布をすると仮定すると、

$$P(E_i|E) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |V|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(E_i - f(E))^T V^{-1}(E_i - f(E))\right] \quad (10)$$

ここで、 V は E_i の共分散行列 (covariance matrix) ($n \times n$) である。

E は排反事象 E_i のいずれかによって必ず起こる確率であるから

$$P(E) = P(E_1)P(E|E_1) + \dots + P(E_n)P(E|E_n) \quad (11)$$

E の起こる確率は、経験的なある推定値 E_0 (初期値) のまわりに正規分布をすると仮定すると、

$$P(E) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |V_E|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(E - E_0)^T V_E^{-1}(E - E_0)\right] \quad (12)$$

ここで、 E_0 は E の先験的な推定値、 V_E は E_0 の共

分散行列 ($m \times m$) である。

E_i が得られた後で $P(E|E_i)$ を最大にするためには、 $P(E) \cdot P(E_i|E)$ を最大にすればよい。即ち、

$$P(E) \cdot P(E_i|E) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{n+m} |V_E| \cdot |V|}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(E_i - f(E))^T \cdot V^{-1}(E_i - f(E)) - \frac{1}{2}(E - E_0)^T \cdot V_E^{-1}(E - E_0)\right] \quad (13)$$

において、

$$g(E) = (E_i - f(E))^T \cdot V^{-1}(E_i - f(E)) + (E - E_0)^T V_E^{-1}(E - E_0) \quad (14)$$

とおき $g(E)$ を最小にするために

$$F(E) = \frac{\partial g(E)}{\partial E} = -D^T V^{-1}(E_i - f(E)) + V_E^{-1}(E - E_0) = 0 \quad (15)$$

の解を求めることに帰着する。

ここに、 D は $f(E)$ を E で偏微分した行列 ($n \times m$) で

$$D_{ij} = \frac{\partial f_i(E)}{\partial E_j} \quad (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

上式を Bayes の最小 2 乗法における正規方程式 (normal equation) と呼ぶ。

$F(E) = 0$ は一般に非線形偏微分方程式であるので、解析的に解くことは出来ない。従って、ここでは Newton-Raphson の方法として有名な反復公式

$$E^{(n+1)} = E^{(n)} - \frac{F(E^{(n)})}{F'(E^{(n)})} \quad (7)$$

によって解くことにする。

今、第 n 次近似を $E^{(n)}$ とすれば

$$E^{(1)} = E_0 \quad (18)$$

$$E^{(n+1)} - E^{(n)} = [D^T(E^{(n)})V^{-1}D(E^{(n)}) + V_E^{-1}]^{-1} \cdot F(E) < \varepsilon \quad (19)$$

このようくり返し (iteration) 演算を行うことによって正規方程式の解 \hat{E} を求めれば、 \hat{E} が E の推定値である。なお、 E_0 は前日のデータによる予測値を用いる。

Bayes の最小 2 乗法を用いて軌道パラメータを推定する場合、観測量を E_i 、観測量に対応した推定量を c とすると、観測モデルは

$$C_i = f(r_t, \dot{r}_t, r_s) \quad (20)$$

で表すことが出来る。

ここで、 C_t は時刻 t における推定値、 $\mathbf{r}_t, \dot{\mathbf{r}}_t$ は衛星の位置、速度ベクトルでいずれも地球固定座標系で表される。又 \mathbf{r}_s は $\mathbf{r}_t, \dot{\mathbf{r}}_t$ によらないパラメータである。

Newton-Raphson 法を用いて C を求める場合、各 $E^{(n)}$ に対して $f_i(E^{(n)})$ および $E=E^{(n)}$ における $\partial f_i/\partial E$ ($i=1, 2, \dots, n$) を計算する必要がある。

まず $f_i(E^{(n)})$ の計算は C_t の式において $E^{(n)}$ をパラメータとして $\mathbf{r}_t, \dot{\mathbf{r}}_t$ は運動方程式を積分することにより求め、 \mathbf{r}_s は観測局位置を示すパラメータである。

次に、 $E=E^{(n)}$ における $\partial f_i/\partial E$ の計算で、 E のうちで運動方程式に現れるパラメータを E_α 、そうでないパラメータを E_β とする。

即ち

$$E = \begin{pmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{pmatrix} \quad (21)$$

E_α に関する偏微分係数は、時刻 t_0 における衛星の位置、速度を慣性座標系で表し、

$$X_t = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_{t_0} \\ \dot{\mathbf{r}}_{t_0} \end{pmatrix} \quad (22)$$

とおくと、

$$\frac{\partial f_i}{\partial \alpha} = \frac{\partial f_i}{\partial X_t} \cdot \frac{\partial X_t}{\partial \alpha} \quad (23)$$

で表され、 $\partial f_i/\partial X_t$ は距離データの場合、

$$\frac{\partial f_i}{\partial X_t} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{r}_t} & \frac{\partial \mathbf{r}_t}{\partial \mathbf{r}_{t_0}} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1 \times 6) \quad (24)$$

から直接計算出来、 $\partial X_t/\partial E_\alpha$ は変分方程式 (variational equation) を積分することによって求められる。なお、運動方程式、変分方程式については後に述べる。

E_β に関する偏微分係数は、観測におけるタイミングエラー、観測機器のバイアス量などの補正式から計算する。

こうして、観測量 E_i 、観測モデルの推定量 C を用いて $E^{(n)}$ を求めることにより、 $E_i-E^{(n)}$ の2乗平均の平方根 (root mean square, RMS) の変化率を ε で判定し、 E を推定する。

先の Bayes の式 $g(E)$ において、共分散行列の逆行列 V^{-1} 、 V_E^{-1} は重み行列として定義されており、その意味で、Bayes の定理を用いたこの推定法を、ベイズの重みつき最小2乗法 (Bayesian Weighted Least Squares Method) と呼ぶ。

なお、このような点推定 (point estimation) をする場合、統計的決定方式 (statistical decision procedure)

に従って推定量の不偏性を証明し、最小2乗法における損失関数 (loss function) を決定し、期待損失が小さいことを確かめる必要があるが、本稿では省略することにする。

8. 運動方程式

宇宙空間に2つだけの質点と考えるとよい天体が存在して相互の引力のもとに公転している場合には、その公転軌道は S. E. Newton (1642-1727) の運動の3法則 (Newton's three laws of motion) により、2つの天体の重心を焦点とする2次曲線となることが知られている。このような取扱いを2体問題 (two-body problem) と呼ぶ。

ところが、第3の天体が存在したり、運動径路にその運動をさまたげようとする物質が存在したり、天体の質量分布が球対称でなかったりする場合には、軌道は2次曲線でなくなるばかりか、その軌道の形や位置が変わったり、軌道上の公転周期が変わってくる。このように、Newton の2次曲線運動からのずれ、およびずれる現象を摂動 (perturbation) という。

任意の質量 $m_i (>0)$ をもつ n 個の質点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$) が Newton の運動方程式に従って運動する場合、

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = k^2 \sum_{j=1, j \neq i}^n m_i m_j \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3} \quad (25)$$

ここで

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (26)$$

\mathbf{r}_{ij}/r_{ij} はベクトル \mathbf{r}_{ij} の方向の単位ベクトル、 k^2 は万有引力定数を表す。

上の運動を論ずる問題を n 体問題 (problem of n bodies) という。 $n > 2$ の場合は、数学的に完全に解くことは出来ない。

n 体問題で質量 m_2, \dots, m_n が質量 m_1 に比べて非常に小さい場合、第 n 体の運動を論ずるのに、はじめ $m_2 = \dots = m_{n-1} = 0$ として m_1 と m_n とだけの2体問題を解き、次に m_2, \dots, m_{n-1} の影響を入れた場合の解の偏差を求める方法を摂動法という。この際に、摂動関数を展開して偏差を理論的に求めるのを一般摂動論 (general theory of perturbation)、偏差を数値積分法によって求めるのを特別摂動論 (special theory of perturbation) と呼んでいる。衛星の軌道を高精度で決定することが必要な場合には、運動方程式が複雑になり、解析解を求めることは困難である。

本システムでは、特別摂動論により衛星の軌道を計算

しているのので、以下にその概要を記述することにする。

地球のごく近くを運動する人工衛星の運動を論ずるときは、地球はもはや質点あるいは球と考えることは出来ず、扁平な回転楕円体としなければならない。この場合、地球の重力の場におけるポテンシャルの非球対称による力が衛星の運動に外力として作用する。この他に摂動力として、月および太陽の引力、太陽放射圧による外力を考慮する。なお、大気抵抗による外力が存在するが、静止衛星の場合は無視出来る量であるので考慮しないことにした。

これらの摂動力による衛星の加速度の合力を求めると、これが被摂動天体(衛星)の加速度となる。衛星がその時にもっている加速度とこの加速度とを組合せると、それからしばらくの間の運動状態を規定することが出来る。

8.1 地球重力ポテンシャルの非球対称による力

地球の重力場のポテンシャルは、極座標 (r, φ, λ) の点で

$$U = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n \times (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) p_n^m(\sin \varphi) \right] \quad (27)$$

で表すことが出来る。

ここで C_{nm}, S_{nm} は重力ポテンシャル係数、 p_n^m は球関数 (spherical function) における Legendre の同伴関数 (associated Legendre function) で、 m は位数 (order)、 n は次数 (degree) を表す。また、 r は地球半径、 φ は緯度、 λ は経度を表す。一般に $0 \leq m \leq n$ 、 $n=2, 3, \dots$ である。又、 a は地球半径で 6.37814×10^8 cm、 GM は重力定数で 3.98601×10^{20} cm²sec⁻² である。

近年、重力ポテンシャル係数は人工衛星の軌道観測により、くわしく計算されており、SAO Special Report No. 264 によると、 10^{-6} の単位で、 $C_{20}=1082.639$ 、 $C_{22}=2.38$ 、 $S_{22}=-1.35$ 、 $C_{30}=-2.546$ 、 $C_{31}=1.71$ 、 $S_{31}=0.23$ 、 $C_{32}=0.84$ 、 $S_{32}=-0.51$ 、 $C_{33}=0.66$ 、 $S_{33}=1.43$ などとなっている。

現在、毎日の軌道決定・予測処理では $m=15$ 、 $n=15$ として、ポテンシャルを計算している。

このポテンシャル U による衛星の加速度は

$$\ddot{x} = \frac{\partial u}{\partial r} \frac{dr}{dx} + \frac{\partial u}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (28)$$

から求めることが出来る。 \ddot{y} 、 \ddot{z} についても同様である。

8.2 月と太陽による引力

今、地球、衛星の質量をおのおの M, m 、摂動天体(太

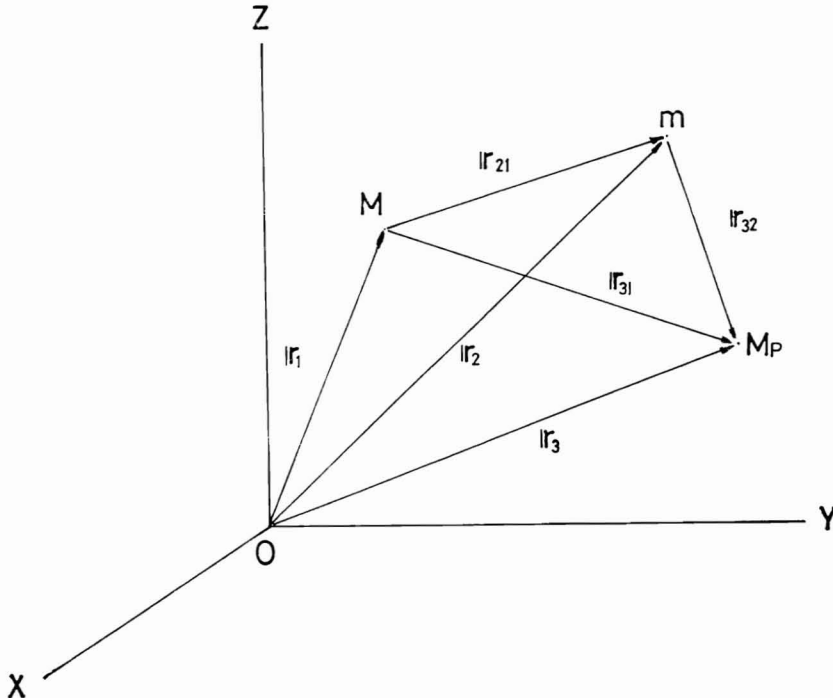


Fig. 2 Problem of three bodies.

陽又は月)の質量を M_p , 万有引力定数を G , 慣性座標系において, 地球, 衛星, 摂動天体の位置ベクトルを Fig. 2 のように定義する。

そこで, 3体問題における摂動力を考える。

地球および摂動天体の引力による衛星の運動方程式は

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}_2}{dt^2} = -G \frac{Mm}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21} + G \frac{mM_p}{r_{32}^3} \mathbf{r}_{32} \quad (29)$$

又, 摂動天体の引力による地球の運動方程式は

$$M \frac{d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} = G \frac{MM_p}{r_{31}^3} \mathbf{r}_{31} \quad (30)$$

(29)-(30) をつくと,

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_{21}}{dt^2} = -\frac{GM}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21} + GM_p \left(\frac{\mathbf{r}_{32}}{r_{32}^3} - \frac{\mathbf{r}_{31}}{r_{31}^3} \right) \quad (31)$$

となる。

(3) 式において, 右辺の第1項は地球の引力による衛星の加速度を表し, 摂動天体の引力による衛星の加速度としては,

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = GM_p \left(\frac{\mathbf{r}_{32}}{r_{32}^3} - \frac{\mathbf{r}_{31}}{r_{31}^3} \right) \quad (32)$$

を計算すればよい。

8.3 太陽の放射圧による外力

単位時間に地球表面の単位面積あたりに降り注がれる太陽の放射エネルギーは, 太陽定数 (Solar constant, So) と呼ばれ,

$$\text{So} = 1.35 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2 \text{ sec} \quad (33)$$

である。

今, 衛星の質量を m , 実効断面積を A , 太陽, 衛星間の距離を r , 太陽, 地球間の距離を r_0 , 光速を c , 衛星の太陽の放射方向に直角な面からの傾きを θ , 光の反射係数を R とすると, 太陽放射圧 (Solar radiation pressure) による衛星の加速度 a_s は,

$$a_s = \frac{S_0(1+R) \cos^2 \theta}{c} \left(\frac{A}{m} \right) \left(\frac{r_0^2 \mathbf{r}}{r^3} \right) \quad (34)$$

により, 計算することが出来る。ここで \mathbf{r} は太陽から衛星へのベクトルである。

9. 変分方程式

先の推定理論の項で, 未知パラメータ E のうち, 運動方程式に現れるパラメータを E_α とおいたが, これは基準時刻 (epoch time) における衛星の位置, 速度に相当する。

今, \mathbf{r}_t を慣性座標系で表した時刻 t における衛星の位置, 基準時刻における衛星の位置, 速度を α_i とし,

$$X_t = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_t \\ \dot{\mathbf{r}}_t \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$E_\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_6 \end{pmatrix} \quad (36)$$

とおく。

このとき,

$$\frac{\partial X_t}{\partial E_\alpha} = \frac{\partial}{\partial E_\alpha} (\mathbf{r}_t) \quad (37)$$

を変分方程式を積分することによって解くことが本節の目的である。

対象とする運動方程式を次のように定義する。

$$\ddot{\mathbf{r}} = \nabla U + A_R \quad (38)$$

ここで U は地球, 月, 太陽による重力ポテンシャル, A_R は太陽放射圧による衛星の加速度, 又 ∇ (nabla) は微分演算子 ($\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$) を成分とするベクトル演算子で傾き (gradient) を表す。

(38) の両辺を E_α で偏微分して,

$$\frac{\partial \ddot{\mathbf{r}}}{\partial E_\alpha} = -\frac{\partial}{\partial E_\alpha} (\nabla U + A_R) \quad (39)$$

ここで

$$\mathbf{r}_t = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} \quad (40)$$

とすると, 重力は位置のみによって決まるから,

$$\frac{\partial}{\partial E_\alpha} \left(\frac{\partial U}{\partial r_i} \right) = \sum_{m=1}^3 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r_i \partial r_m} \right) \frac{\partial r_m}{\partial E_\alpha} \quad (41)$$

$$(i=1, 2, 3)$$

又, 太陽放射圧の位置座標に関する偏微分は微小であることを考慮して, (38) を行列式で表すと,

$$F = |U_D| X_m \quad (42)$$

ここで,

$$F = \begin{vmatrix} \frac{\partial \ddot{r}_t}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial \ddot{r}_t}{\partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial \ddot{r}_t}{\partial \alpha_6} \end{vmatrix} \quad (43)$$

$$(3 \times 6)$$

$$U_D = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial r_i \partial r_1} & \frac{\partial^2 U}{\partial r_i \partial r_2} & \frac{\partial^2 U}{\partial r_i \partial r_3} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (44)$$

$$(i=1, 2, 3) \quad (3 \times 6)$$

$$X_m = \left| \frac{\partial X_t}{\partial \alpha_1} \frac{\partial X_t}{\partial \alpha_2} \dots \frac{\partial X_t}{\partial \alpha_6} \right| \quad (45)$$

(6×6)

となる。

(42) は36個の式で表され、 $\partial \mathbf{r}_t / \partial E_\alpha = \mathbf{y}$ とおくと、

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t) \quad (46)$$

となり、運動方程式の場合と同様にして、数値積分により解くことが出来る。

(39) および (42) 式を変分方程式と呼ぶ。

(39) において、

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{r}}_t}{\partial E_\alpha} = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \mathbf{r}_t}{\partial E_\alpha} \right) \quad (47)$$

であるから、 $\partial \mathbf{r}_t / \partial E_\alpha$ を求めるには、変分方程式を2回積分すればよく、又 $\partial \dot{\mathbf{r}}_t / \partial E_\alpha$ は1回積分すればよい。

実際の計算は、(42) で $\mathbf{r}_t, \dot{\mathbf{r}}_t$ は既知でなければならぬので、運動方程式の積分を1ステップ進めて(42)に代入し、 U_D を計算して変分方程式の積分を更に1ステップ進めるという方法をとる。

10. 運動方程式の数値積分

これまでの考察から、摂動力を含めた衛星の質点運動は、非線形常微分方程式(48)の形で表現されるので、与えられた時刻における軌道要素を初期値として数値積分を行い、任意の時刻での衛星の位置、速度ベクトルを求めることが出来る。

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t) \quad (48)$$

ここで、 $i=1, 2, 3$ でそれぞれ座標成分 x, y, z を表す。

常微分方程式の初期値問題 (initial value problem of ordinary differential equation) を数値的に解く場合は、すべて常微分方程式を近似な差分方程式 (difference equation) でおきかえて解く方法をとる。

まず、一定間隔 h をもつ各分点上の関数値を逐次計算するために、その準備段階として最初の数個の分点上の出発値をできるだけ正確に求めておく必要がある。

本プログラムでは、この出発値を8次のRunge-Kutta法を用いて $n+1$ 個の関数値 $y_0, y_1, \dots, y_n, \dot{y}_0, \dot{y}_1, \dots, \dot{y}_n$ を求め、以下にのべる予測子-修正子法 (predictor-corrector method) により、(48) の解を求めている。

この方法の定義は、初期値問題 (48) において、関数値 $y_0, y_1, \dots, y_n, \dot{y}_0, \dot{y}_1, \dots, \dot{y}_n$ が与えられているとき、前進外挿形の公式によって y_{n+1}, \dot{y}_{n+1} の値を推定

し、これを内挿形の公式によって逐次修正して固定した値を関数値 y_{n+1}, \dot{y}_{n+1} とするといふもので、 y_{n+1}, \dot{y}_{n+1} の推定用の外挿形の公式を予測子 (predictor)、修正用の内挿形の公式を修正子 (corrector) という。

今、数値積分における後進差分演算子 ∇ を次のように定義する。

$$\nabla f(t) = f(t) - f(t-h) \quad (49)$$

$$\nabla^n f(t) = \nabla(\nabla^{n-1} f(t)) = \sum_{i=0}^n (-1)^i \binom{n}{i} f(t-ih) \quad (50)$$

又、

$${}^I S_m = \nabla^{-1} \dot{y}_m \quad (51)$$

$${}^{II} S_m = \nabla^{-2} \dot{y}_m \quad (52)$$

とおく。

予測子として、

$$\dot{y}_{m+1} = h \left[\alpha_0 {}^I S_m + \alpha_1 \dot{y}_m + \sum_{i=2}^n \alpha_i \nabla^{i-1} \dot{y}_m \right] \quad (53)$$

(Adams-Bashforth の公式)

$$y_{m+1} = h^2 \left[\beta_0 {}^{II} S_m + \beta_1 {}^I S_m + \beta_2 \dot{y}_m + \sum_{i=3}^n \beta_i \nabla^{i-2} \dot{y}_m \right] \quad (54)$$

(Störmer)

ここで、

$$\alpha_0 = 1, \alpha_i = 1 - \sum_{j=1}^i \frac{\alpha_{i-j}}{j+1} \quad (55)$$

$$\beta_0 = 1, \beta_i = 1 - \sum_{j=1}^i \frac{2H_{j+1}}{j+2} \beta_{i-j} \quad (56)$$

$$H_m = \sum_{k=1}^m \frac{1}{k} \quad (m=1, 2, \dots) \quad (57)$$

を用いる。

又、修正子としては、

$$\dot{y}_{m+1} = h \left[\alpha_0^* {}^I S_m + (\alpha_0^* + \alpha_1^*) \dot{y}_{m+1} + \sum_{i=2}^n \alpha_i^* \nabla^{i-1} \dot{y}_{m+1} \right] \quad (58)$$

(Adams-Moulton)

$$y_{m+1} = h^2 \left[\beta_0^* {}^{II} S_m + (\beta_0^* + \beta_1^*) {}^I S_m + (\beta_0^* + \beta_1^* + \beta_2^*) \dot{y}_m + \sum_{i=3}^n \beta_i^* \nabla^{i-2} \dot{y}_{m+1} \right] \quad (59)$$

(Cowell)

ここで、

$$\alpha_0^* = 1 \quad (60)$$

$$\alpha_i^* = - \sum_{j=1}^i \frac{\alpha_{i-j}^*}{j+1} \quad (61)$$

$$\beta_0^* = 1 \quad (62)$$

$$\beta_i^* = - \sum_{j=1}^i \frac{2H_{j+1}}{j+2} \beta_{i-j}^* \quad (63)$$

を用いる。

このようなくり返し計算により、所要の修正子 y_{m+1} , \dot{y}_{m+1} を得る。

なお、これらの公式の詳細、打ち切り誤差 (truncation error), 丸めの誤差 (round off error) の評価等は、数値計算書に譲ることとする。

11. 出力

TRRR データを入力して、データの編集、前処理を行い、基準時刻における軌道要素を決定し、任意の時刻における衛星の位置、速度を予測し、この予測値を姿勢および画像一次処理に転送するまでの一連の処理を、軌道データ処理 (Orbit data processing) という。

軌道データ処理では、出力形式として、Disk Pack, List, Display がある。以下にその主な項目を掲げる。

11.1 Disk Pack

1950.0平均慣性座標系および真の慣性座標系における基準時刻の軌道6要素, $[a, e, i, \Omega, \omega, M]$ 。

1950.0平均慣性座標系および地球固定座標系における基準時刻を中心として、以前3日、以後10日間の衛星の位置、速度の予測値, $[x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]$ 。時間間隔は5分。

グリニッチ真恒星時, (θ_g) 。

衛星から太陽へのベクトル。1950.0平均慣性座標系における赤経、赤緯および地球固定座標系における経、緯度。

衛星から月へのベクトル。1950.0平均慣性座標系における $[x, y, z]$ 。

衛星直下点の経、緯度および高度。

日蝕情報。

11.2 List

上記の Disk Pack の内容の出力に加えて、TRRR

データ。観測データおよび前処理済みデータ。

Newton-Raphson の反復計算における統計情報などがある。

11.3 Character Display

観測局、観測回毎のデータの選択、出力 List の選択が出来る。

収束状況の表示

基準時刻における軌道6要素の表示等。

11.4 Graphic Display

軌道の予測期間 (基準時刻の以前3日、以後10日間) における衛星直下点の軌跡を図形表示。

姿勢の予測期間 (精姿勢決定の場合、基準時刻の以前1日、以後4日間) における衛星のスピン軸方向の赤経、赤緯の軌跡を図形表示。

予測期間内の任意の時刻を指定することにより、軌道および姿勢の各要素の予測値を表示。

これらの表示はオンライン系計算機で行われる。

文 献

- 鳥海良三他, 1968: 角度測定・トップラ周波数測定併用のトラッキング方式の計算処理に関する研究, 航空宇宙技術研究所報告, 168.
- 佐分利義和, 1977: 時刻標準と時刻同期について, 電波研究所発表会予稿, 54.
- 柴田 久, 1963: 人工衛星電波の大気による屈折効果, 電波研究所季報, Vol. 9, No. 45.
- 永井 裕, 1977: 静止衛星の軌道決定精度に関する考察, 日本航空宇宙学会誌, 284.
- 大井 清他, 1973: 特別摂動法による人工衛星の軌道計算について, 電子通信学会全国大会予稿。
- Escobal, P. R., 1976: Method of Orbit Determination, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Lundquist, C. A. (ed.): Geodetic Satellite Results during 1967, Smithsonian Astrophysical Observatory Special Report No. 264, SAO, Massachusetts.

7. 姿勢データ処理

7. Attitude Determination and Prediction System

Abstract

Attitude Determination of GMS consists of two procedures: Coarse attitude using earth sensor and sun sensor, the other precise attitude using landmarks. Our goal of accuracy to be achieved for the former is 0.1 degrees and 0.008 degrees for the latter.

For coarse attitude determination, the sensor data measured by the sun sensor and earth sensor mounted on the satellite are sent to MSC via CDAS as the real time telemetry data. Using statistical estimation method, with these data input, initial attitude is updated, and its prediction over eight days is made by a numerical integration of the equation of motion prescribing the rigid body behavior of the satellite. The influence of the sun radiation pressure as an external torque is taken into account in that equation.

For precise attitude determination, the manual extraction of landmarks is made by displaying visible image on image processing console (similar to NESS MMIPS).

Thereafter, i, j coordinate of the landmark on the image is obtained by making use of cross-correlation method in reference to the template image which is processed using nominal attitude and orbital data.

Together with i, j coordinate of the landmark already obtained and theoretical ones, initial attitude is updated using weighted least square method. Then attitude for 120 hours is predicted by the same procedure as the prediction of coarse attitude.

概要

スピン安定の GMS (Geostationary Meteorological Satellite) の姿勢はスピン軸方向 (実際には角運動量ベクトル方向) をもって定義する。

GMS の場合 この姿勢状態を NASDA (National Space Development Agency of Japan) と JMA でそれぞれ決定している。NASDA は GMS の追跡管制のために、JMA は VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 画像データを処理する上で要請される姿勢情報を作成するために、それぞれ処理している。

JMA の姿勢データ処理は、衛星搭載姿勢センサのデータを用いる粗姿勢処理と、VISSR 画像データを用いる精姿勢処理の 2 つの処理からなっている。

粗姿勢処理は GMS の運用管制の情報作成を主目的とし、精姿勢処理のバックアップ的機能も有している。精姿勢処理は VISSR により観測された画像を精密に処理するために観測画像と地表面との対応を精度良くとるための情報作成を目的としている。

それぞれの処理の決定精度はスピン軸角で粗姿勢約 0.1 度、精姿勢 0.008 度 (4 画素相当) 以内を目標としている。

1. 処理システム

姿勢データ処理はランドマーク抽出プログラムと姿勢決定予測プログラムの 2 つのプログラムで処理される。

ランドマーク抽出処理は精姿勢処理の入力データ処理に対応し、VISSR が撮像した画像上の特徴地形 (ラン

ドマーク）とあらかじめランドマーク毎に用意した基準画像（テンプレート）とのパターンマッチングをとってランドマークの VISSR 画像座標での位置を観測値データとして作成する。

姿勢決定予測処理は粗姿勢処理の入力データ処理に対応するセンサデータ前処理を含むが、両入力データに対して粗姿勢および精姿勢の両決定予測処理がひとつのプログラムで処理される。

この処理の前半は決定（推定）処理で、用いるデータ、使用する推定方法および運動モデルによっていくつかの組合せができる。

推定方法としては非線形運動を考慮した非線形加重最小自乗法とカルマン型バッチシーケンシャルフィルタを更に平方根フィルタの概念で用いた2つの統計的な推定方法とセンサデータから直接瞬時決定値を求めた後スムージングする合計3つの方法がある。運動モデルとしてはオイラーの方程式を平均化した平均技法と運動を時間の多項式で扱う多項式モデルの2つがあり、更に平均技法も積分を数値的に行なう方法と解析的に行なう方法の2つの方法をもつ。

処理の後半は姿勢データ処理の処理目的である姿勢予測ファイルを作成する予測処理である。姿勢予測は推定処理で用いた運動モデルに従って予測計算を行なう。

2. マンマシン処理

姿勢データ処理では、上記の様に処理形態を幾組か持ち、かつ形態を変えて連続して処理するなど処理の柔軟性を持たせるためキャラクターディスプレイ；GOC (GMS Operating Console) 1台、またランドマーク抽出ではランドマークの指定やマッチング状態をチェックする等のために TV ディスプレイ；IPC (Image Processing Console) 2台を用いたマンマシンインタラクション処理が含まれている。

3. 推定理論

姿勢データ処理の中心的処理は推定処理である、扱う観測式が非線形であり、運動方程式も非線形であるため、扱う式が複雑であるが、ここでは線形の推定理論から実際に処理で用いている推定方法まで簡単にまとめてみる、式の展開がいきなり飛んで読み難いが詳細は Hughes Aircraft Company による文献を参照していただきたい。

3.1 線形最小自乗法

$$\text{観測式 } y = Hx + v \quad (1)$$

$y = (y_1, y_2 \dots y_m)^T$ m 次元観測ベクトル (T は転置)

$x = (x_1, x_2 \dots x_n)^T$ n 次元状態ベクトル

$v = (v_1, v_2 \dots v_m)^T$ m 次元ノイズベクトル

$E[y] = \vec{0}$ E は期待値

H システムに固有な既知の ($m \times n$) 行列

評価関数 $\phi = (y - \bar{y})^T (y - \bar{y})$

$$\bar{y} = H\bar{x} \quad \bar{x} \text{ は推定値} \quad (2)$$

最適推定値 \hat{x} は $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$ になる \bar{x} である

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (3)$$

時前共分散を考慮したベイズの線形加重最小自乗法

$$E[vv^T] = R \quad (4)$$

$$E[(x - \bar{x})(x - \bar{x})^T] = M \quad (5)$$

$$\text{評価関数 } \phi = \frac{1}{2} \left[(x - \bar{x})^T M^{-1} (x - \bar{x}) + (y - Hx)^T R^{-1} (y - Hx) \right]$$

最適推定値 $\hat{x} = \bar{x} + PH^T R^{-1} (y - H\bar{x})$

$$P = (P_0^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} \quad (6)$$

$P_0 = M$ 推定パラメータ x に対する共分散行列 (時前共分散)

P 最適推定パラメータ \hat{x} に対する共分散行列

3.2 非線形加重最小自乗法

$$\text{観測式 } y = h(x) + v \quad (7)$$

$h(x)$ m 次元非線形ベクトル関数

観測式の線形化

真値に十分近い値 x^0 のまわりでテイラー展開し一次項まで採用し線形化する

$$y = h(x^0) + H(x - x^0) + v \quad (8)$$

$$H = \left(\frac{\partial h_i}{\partial x_j} \right)_{x=x^0} \quad \begin{matrix} i=1, 2, \dots, m \\ j=1, 2, \dots, n \end{matrix}$$

$$E[x] = x^0 \quad (9)$$

$$W = R^{-1} \quad (10)$$

$$P_0 = E[(x - x^0)(x - x^0)^T] \quad (11)$$

x の近似値を x^1 とすると

$$x^1 = x^0 + p_1 H^T W (y - h(x^0)) \quad (12)$$

$$P_1 = E[(x - x^1)(x - x^1)^T] = (P_0^{-1} + H^T W H)^{-1} \quad (13)$$

x^1 のまわりで観測式を再線形化する

$$y = h(x^1) + H_{x=x^1}(x - x^1) + v \quad (14)$$

$$E[x - x^1] = x^0 - x^1 \quad (15)$$

$$E[\{(x - x^1) - (x^0 - x^1)\} \{(x - x^1) - (x^0 - x^1)\}^T] = E[(x - x^0)(x - x^0)^T] = P_0 \quad (16)$$

x^1 の改良

$$x^2 - x^1 = x^0 - x^1 + P_2 H^T W \{y - h(x^1) - H(x^0 - x^1)\} \quad (17)$$

$$x^2 = x^0 + P_2 H^T W \{y - h(x^1) - H(x^0 - x^1)\} \quad (18)$$

$$P_2 = (P_0^{-1} + H^T W H)^{-1} \quad (19)$$

同様にして x^{k-1} の改良は次の様になる

$$\begin{aligned} x^k &= x^0 + P_k H^T W \{y - h(x^{k-1}) - H(x^0 - x^{k-1})\} \\ &= x^{k-1} + P_k [H^T W \{y - h(x^{k-1})\} \\ &\quad + P_0^{-1}(x^0 - x^{k-1})] \end{aligned} \quad (20)$$

$$P_k = (P_0^{-1} + H^T W H)^{-1}$$

$$H = \left(\frac{\partial h_i}{\partial x_j} \right)_{x=x^{k-1}}$$

3.3 非線形運動を考慮した 推定—非線形系の フィルタリング

$$\text{非線形運動方程式 } \dot{x}(t) = f(x(t)) \quad (21)$$

$$\text{修正量の遷移式 } \delta x(t) = \Phi(t_1, t_0; \bar{x}) \delta x(t_0) \quad (22)$$

$$\delta x(t) = x(t) - \bar{x}(t)$$

$$\Phi(t_1, t_0; \bar{x}) = \int \left. \frac{\partial f_i(x(t))}{\partial x_j(t_0)} \right|_{x=\bar{x}} dt \quad \text{遷移行列}$$

観測式の線形化

$$y(t_j) = h(x^0(t_j)) + H(x^0(t_j)) \delta x(t_j) + v(t_j) \quad (23)$$

$x^0(t_j)$ は初期推定値 $x^0(t_0)$ を初期値として運動方式を積分したものである。

$$H(x^0(t_j)) = \left. \frac{\partial h_i(x(t_j))}{\partial x_j(t_j)} \right|_{x=x^0(t_j)}$$

パラメータの遷移行列を組み込んで観測式を書き替えると次の線形観測式が得られる。

$$z = H'x + v \quad (24)$$

$$z = y(t_j) - h(x^0(t_j))$$

$$H' = \left. \frac{\partial h_i(x(t_j))}{\partial x_j(t_j)} \right|_{x=x^0(t_j)} \Phi(t_j, t_0; x^0)$$

$$x = \delta x^0(t_0)$$

$$v = v(t_j)$$

$x^0(t_0)$ の改良

$$\begin{aligned} x^1(t_0) &= x^0(t_0) + P_1 \sum_{j=1}^{\mu} \Phi^T(t_j, t_0) H^T (x^0(t_j)) \\ &\quad \cdot W(t_j) \{y(t_j) - h(x^0(t_j))\} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} P_1^{-1} &= P_0^{-1} + \sum_{j=1}^{\mu} \Phi^T(t_j, t_0) H^T (x^0(t_j)) \\ &\quad \cdot W(t_j) H(x^0(t_j)) \Phi(t_j, t_0) \end{aligned} \quad (26)$$

k 番目の改良値

$$\begin{aligned} x^k(t_0) &= x^{k-1}(t_0) + P_k \left[\sum_{j=1}^{\mu} \Phi^T(t_j, t_0) H^T (x^{k-1}(t_j)) \right. \\ &\quad \cdot W(t_j) \{y(t_j) - h(x^{k-1}(t_j))\} \\ &\quad \left. + P_0^{-1} \{x^0(t_0) - x^{k-1}(t_0)\} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} P_k^{-1} &= P_0^{-1} + \sum_{j=1}^{\mu} \Phi^T(t_j, t_0) H^T (x^{k-1}(t_j)) \\ &\quad \cdot W(t_j) H(x^{k-1}(t_j)) \Phi(t_j, t_0) \end{aligned} \quad (28)$$

上式のように新しい推定パラメータが算出され、それらの推定値がフィードバックされて時間の変化とともに新たな情報によって推定パラメータが求まる。このフィルタは「代替処理モード」の推定法として用いられている。

3.4 プロセスノイズを考慮した 非線形加重最小自乗法—カルマン型 バッチシーケンシャル フィルター

非線形運動方程式

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t) + G(x(t), t) \omega(t) \quad (29)$$

$G(x(t), t)$ プロセスノイズの変換行列

$\omega(t)$ プロセスノイズ

$$E[\omega(t)] = 0 \quad (30)$$

$$E[\omega(t) \omega^T(t)] = Q(t) \quad (\text{対角行列}) \quad (31)$$

姿勢データ処理としては3時間毎の VISSR データであるが1日分のデータを同じ系のデータとして扱い一度にデータ処理を行ない（バッチシーケンシャル）データ処理としては前述の非線形系フィルタを用いる。

プロセスノイズはある元期 t_0 の初期値が与えられた場合、事前共分散をデータ処理の元期 t に遷移させる時に考慮する、即ち初期値については非線形運動方程式を

$x(t) = \int_{t_0}^t f(x(t), t) dt$ で積分し、事前共分散は次式で求める。

$$P_0(t) = \Phi(t, t_0) P_0(t_0) \Phi^T(t, t_0) + G(t) Q(t) G^T(t) \quad (32)$$

この処理を「元期更新」と呼ぶ。

3.5 平方根フィルター—SQ カルマン型パッチンケンシャルフィルター

共分散データを扱う場合、数値計算上の問題から共分散行列の逆行列（情報行列）を三角行列とその転置行列との積に分解して逐次計算を行なう平方根フィルターを使うと推定時の数値誤差が小さくなる。

この型を姿勢データ処理の主推定法として用い、「S. Q カルマンモード」と呼ぶ。

「代替処理モード」のデータ処理を次式のように書き替える。

$$x^* = P A^T W Z + P P_0^{-1} x^{0*} \quad (33)$$

$$P^{-1} = P_0^{-1} + A^T W A \quad (34)$$

P_0 を $U \cdot L$ ($L = U^T U$ は上三角行列) と分解し、 U の逆行列を計算し、 $R_X = U^{-1}$ とする

$$P_0^{-1} = R_{X_0}^T R_{X_0} \quad (35)$$

行列を上三角化する正規直交行列（ハウスホルダーオペレータ）を T とし P を求めると

$$T = (T_1, T_2)$$

$$\begin{aligned} P^{-1} &= R_{X_0}^T R_{X_0} + A^T W^{1/2} W^{1/2} A \\ &= \{R_{X_0}^T (T_1^T) + A^T W^{1/2} (T_2^T)\} \\ &\quad \cdot \{(T_1) R_{X_0} + (T_2) W^{1/2} A\} \\ &= (R_X^T, 0) \begin{pmatrix} R_X \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (36)$$

$$= R_X^T R_X \quad (36)$$

$$\text{ここで} \quad \begin{pmatrix} R_X \\ 0 \end{pmatrix} = (T_1) R_{X_0} + (T_2) W^{1/2} A$$

x^* については次の様に初期値 d_0 を定義して展開する

$$d_0 = R_{X_0} x^{0*} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} x^* &= P (P_0^{-1} x^{0*} + A^T W Z) \\ &= P (R_{X_0}^T R_{X_0} x^{0*} + A^T W^{1/2} W^{1/2} Z) \\ &= P \{R_{X_0}^T (T_1^T) + A^T W^{1/2} (T_2^T)\} \\ &\quad \cdot \{(T_1) d_0 + (T_2) W^{1/2} Z\} \\ &= R_X^{-1} R_X^{-T} (R_X^T, 0) \begin{pmatrix} d \\ \varepsilon \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$= (R_X^{-1}, 0) \begin{pmatrix} d \\ \varepsilon \end{pmatrix}$$

$$= R_X^{-1} d' \quad (38)$$

$$\text{ここで} \quad d' = \begin{pmatrix} d \\ \varepsilon \end{pmatrix} = (T_1) d_0 + (T_2) W^{1/2} Z \quad (39)$$

$$\begin{pmatrix} R_X & d \\ 0 & \varepsilon \end{pmatrix} = (T_1 T_2) \begin{pmatrix} R_{X_0} & d_0 \\ W^{1/2} A & W^{1/2} Z \end{pmatrix}$$

従って「SQ カルマン」のデータ処理は

$$T \begin{pmatrix} R_{X_0} \\ W^{1/2} A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_X \\ 0 \end{pmatrix} \quad (40)$$

$$T \begin{pmatrix} d_0 \\ W^{1/2} Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d \\ \varepsilon \end{pmatrix} \quad (41)$$

同様に事前共分散の「元期更新」処理は

$$P_0(t) = R_{X_0}^{-1}(t) R_{X_0}^{-T}(t) \quad (42)$$

$$\begin{aligned} T' \left[\begin{array}{c|c} I & 0 \\ \hline R_{X_0}(t_0) \Phi^{-1} G Q^{1/2} & R_{X_0}(t_0) \Phi^{-1} \end{array} \right] \\ = \left[\begin{array}{c|c} * & * \\ \hline 0 & R_{X_0}(t) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (43)$$

ここで T' もハウスホルダーオペレータで「*」は零以外のデータを示す

3.6 考慮オプション

数多くの状態変数を推定する場合に、定常になった段階でほとんど変化しない状態変数を除いて少ない数の状態変数のみを推定の方が処理時間や推定した状態変数の値の安定性から都合が良い。

そこで実際に推定する状態変数 x に対して推定しない量 c を無視したことによる効果を予測しておき、もし x の推定値 x^* に対する c の影響が大きければ影響の大きい変数を推定する x の中に加えなければいけない。

c の変動に対する $x^* - x$ の変動を「感度」 S と定義し、また c を無視した準最適推定値 x_a^* の共分散を P_a とすると

$$S = \frac{\partial (x^* - x)}{\partial c} \quad (44)$$

$$P_a = E[(x_a^* - x)(x_a^* - x)^T] \quad (45)$$

この場合の観測式は $y = Ax + Bc + v$ となり、 C の共分散を $P_c = R_c^{-1} R_c^{-T}$ 、 x と c の初期相関を $P_{x c_0} = R_{x c_0}^{-1} R_{x c_0}^{-T}$ とすると、ハウスオペレータ T_a を用い

たデータ処理は次の様になる。

$$T_a \begin{bmatrix} R_{X_0} & R_{X_{c_0}} \\ 0 & R_c \\ W^{1/2}A & W^{1/2}B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_X & R_{X_c} \\ 0 & R_c \\ 0 & * \end{bmatrix} \quad (46)$$

但し T_a は x に対する部分のみを三角化する。

S と P_a は次式となる。

$$S = R_X^{-1} R_{X_c} \quad (47)$$

$$P_a = P + S P_c S^T \quad (48)$$

3.7 収束判定

非線形の観測式に対する最小自乗法推定では、観測式の線形化と反復計算が必要である。反復計算の収束判定条件として次の3つの方法を採用しており、このうちのひとつが満足された段階で「収束した」としている。

3.7.1 残差の加重自乗平均の平方根の変化率

$$\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i (y_i - f_i(\bar{X}_{l+1}))^2}{n-q}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i (y_i - f_i(\bar{X}_l))^2}{n-q}}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i (y_i - f_i(\bar{X}_l))^2}{n-q}} < \varepsilon_1 \quad (49)$$

ここで y_i : i 番目の観測値

W_i : i 番目の観測値の重み

$f_i(\bar{X})$: l 回目の反復計算での状態

n : 観測値の数

q : 推定パラメータ数

3.7.2 残差の加重自乗平均の平方根

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i (y_i - f_i(\bar{X}_l))^2}{n-q}} < \varepsilon_2 \quad (50)$$

データの重みが完全に正しければ「1」になるべき値である。

3.7.3 状態修正量の絶対値

$$|\Delta X_{ol}| < \varepsilon_3 \quad (51)$$

ここで ΔX_{ol} : l 回目の反復計算の状態修正量

この量は状態修正の精度を表わしており、推定精度によって決る。

3.7.4 上記3つの条件がいずれも満足しない時は、最大反復回数 (姿勢データ処理では10回) を越えた場合に「収束しなかった」として処理を打ち切る。

4. 運動モデル

衛星の運動としては軌道運動と姿勢運動があり、ここでは剛体運動としての姿勢運動を考える。

ニュートンを含む姿勢運動を平均した時スピン軸方向は角運動量ベクトルの方向になる。この方向を衛星の姿勢とするのが「平均技法モデル」であり、姿勢運動を時間の多項式で表現するのが「多項式モデル」である。姿勢データ処理ではこの2つの運動モデルがある。なお本項及び次項で用いられる座標系については付録を参照されたい。

4.1 平均技法モデル

剛体の運動式は次式で与えられる

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{T} \quad (52)$$

ここで \vec{L} : 角運動量ベクトル

\vec{T} : 外力によるトルク

\vec{L} は衛星のスピンベクトル \vec{a} の方向と一致するように設計されており、平均技法では \vec{L} の方向を姿勢とみなしている。

\vec{T} は外力として太陽放射圧のみを考えている。

重心から形状中心までのベクトルを \vec{R} 、太陽放射圧の合力を \vec{F} とすると

$$\vec{T} = \vec{R} \times \vec{F} \quad (53)$$

\vec{L} 、 \vec{R} 、 \vec{F} が同一平面にあれば \vec{T} は \vec{L} に垂直となり角運動量 $H = |\vec{L}|$ は保存される。

実際には \vec{T} と \vec{L} は必ずしも直交しないが1日位の期間では近似的に H を一定とみなしうる。(52) 式の左辺は次の様になる

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = H \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} \quad (54)$$

アンテナを含めた衛星の形状は複雑で太陽放射圧によるトルクの算出も複雑になるが姿勢処理ではこのトルクの大きさをスピンベクトル $\vec{a}(X_1, X_2, \sqrt{1-X_1^2-X_2^2})$ と太陽方向ベクトル $\vec{s}(s_x, s_y, s_z)$ の成す角 ϕ のみの関数として次の様に表わす。

$$T = |\vec{T}| = X_3 + X_4(\phi - \phi_0) \quad (55)$$

ここで ϕ_0 はデータスパンでの ϕ の平均値

$$\phi = \cos^{-1}(\vec{a} \cdot \vec{s})$$

又方向については \vec{a} と \vec{s} とから $(\vec{a} \times \vec{s})$ の方向を \vec{T} の正方向としている。

従って平均技法モデルでの運動方程式は(54)と(55)式とから

$$H \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = \{X_3 + X_4(\phi - \phi_0)\} \frac{\vec{a} \times \vec{s}}{|\vec{a} \times \vec{s}|} \quad (56)$$

4.2 運動方程式の積分

運動方程式を積分して解を求める方法として、(56)式を数値的に積分する方法と、解析的に解く方法の2通りの機能を持っている。

通常の処理である「SQ カルマンモード」では8次のルンゲクッタで直接数値積分している。尚(56)式で \vec{L} の単位ベクトル3成分のうち1成分は他の2成分から得られるので l_1, l_2 として x 軸および y 軸の方向余弦 X_1, X_2 で定義すると、(56)式は

$$H \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \sqrt{1 - X_1^2 - X_2^2} \end{pmatrix} = \{X_3 + X_4(\phi - \phi_0)\} \frac{\vec{a} \times \vec{s}}{|\vec{a} \times \vec{s}|} \quad (57)$$

これに対し「代替モード」では座標系の設定と ϕ のモデル式とから近似式を導入し解析的に解いている。

座標系としては次の様に設定する

$$Z' = \vec{a}_0 \quad \vec{a}_0 \text{ は } t=t_0 \text{ でのスピンのベクトル}$$

$$Y' = \frac{\vec{a}_0 \times \vec{s}}{|\vec{a}_0 \times \vec{s}|} \quad \vec{s} \text{ は } t=t_0 \text{ での太陽方向ベクトル}$$

ϕ に関しては次の近似式と補正項を考える

$$\phi = \frac{t}{2} + A \sin(\lambda t + \theta) + B_-(1 - \cos \omega_s t) \quad (58)$$

ここで $A = -\cos^{-1}(|\vec{a} \cdot \vec{n}|)$

\vec{n} : 黄道面に垂直な単位ベクトル

$\dot{\lambda}$: 太陽の角速度

t : 時刻

$$\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{s}}{|\vec{a} \times \vec{s}|} \cos^{-1}(\vec{s} \cdot \vec{X}) : t=t_0 \text{ での太陽の}$$

位置によって決る位相角

\vec{X} : 慣性座標の X 軸ベクトル

$$B_- = \frac{\Delta\phi_-}{1 - \cos \omega_s t} : 1 \text{ ステップ前の } \phi \text{ の変}$$

化量 $\Delta\phi_-$ により求めた ϕ の補正係数

$$\omega_s = \frac{\cos A \sec^2 \lambda}{1 + \cos^2 A \tan^2 \lambda} \dot{\lambda} : \text{太陽ベクトルの}$$

$X' Y'$ 面射影の角速度

運動方程式は次の様になる

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X_1' \\ X_2' \end{pmatrix} = \frac{T}{H} \begin{pmatrix} -\sin \omega_s t \\ \cos \omega_s t \end{pmatrix} \quad (59)$$

4.3 多項式モデル

衛星の剛体運動においてニュートン角が非常に小さく、角運動量ベクトルがなめらかに緩慢に変化すると考えると、姿勢運動を時間の多項式で表現できる

$$\alpha_R = \alpha_0 + \alpha_1(t - t_0) + \alpha_2(t - t_0)^2 + \alpha_3(t - t_0)^3 \quad (60)$$

$$\delta_R = \delta_0 + \delta_1(t - t_0) + \delta_2(t - t_0)^2 + \delta_3(t - t_0)^3 \quad (61)$$

ここで α_R : 慣性座標系において角運動量ベクトルを ZY 平面に射影し、 Z 軸からその射影したベクトルまでの角度

δ_R : 上記の射影されたベクトルと角運動量ベクトルとのなす角度

α_R, δ_R という特殊なパラメータを用いるのは慣性座標系では $\delta = 90^\circ$ で特異点となるがGMSの場合はノミナル値が $\delta = 90^\circ$ でこの特異点を避けるためである。

5. 観測式

3で述べた推定理論の観測式としては粗姿勢のセンサ観測式と精姿勢のVISSR観測式がある。

5.1 センサ観測式

衛星搭載のサンセンサおよびアースセンサのパルスデータを用いて5つのタイプのデータが観測されるので、この観測値に対する計算値を求める観測式は5つになる。

センサデータはFig. 1の様なパルスである

ここで Ψ, Ψ_2 : サンセンサパルス

SES: 南側アースセンサパルス

NES: 北側アースセンサパルス

5つのデータタイプの観測値と計算値は次の様になる。
・タイプ1

$$y_1 = \Psi - \Psi_2 = \left(\frac{T_4 + T_3 - T_2}{2} \right) \times \frac{2\pi}{T_1} \quad (62)$$

$$c_\phi = \sin^{-1} \left[\frac{\cot \{ \cos^{-1}(\vec{a} \cdot \vec{s}) \} + X_5}{\cot \xi} \right] + \Psi_s \quad (63)$$

X_5 : \vec{a} と \vec{s} のコーンバイアス

ξ : 衛星側面での Ψ, Ψ_2 センサの傾き (35°)

Ψ_s ; Ψ, Ψ_2 センサのスピンの軸まわりの取付角 (35°)

・タイプ2

$$y_2 = \frac{\text{SES}}{2} = \left(\frac{T_6 - T_5}{2} \right) \times \frac{2\pi}{T_1} \quad (65)$$

$$e_s = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{r_0^2 - r_e^2} - \cos \phi_e \cos(\gamma_1 + X_6)}{r_0 \sin(\gamma_1 + X_6) \sin \phi_e} \right\} \quad (66)$$

ここで r_0 : 地心から衛星までの距離

r_e : 地球赤道半径

ϕ_e : スピンの軸(\vec{a})と地心方向(\vec{e})のなす角

γ_1 : SES 取付け位置のスピンの軸からの仰角方向角度 (85°)

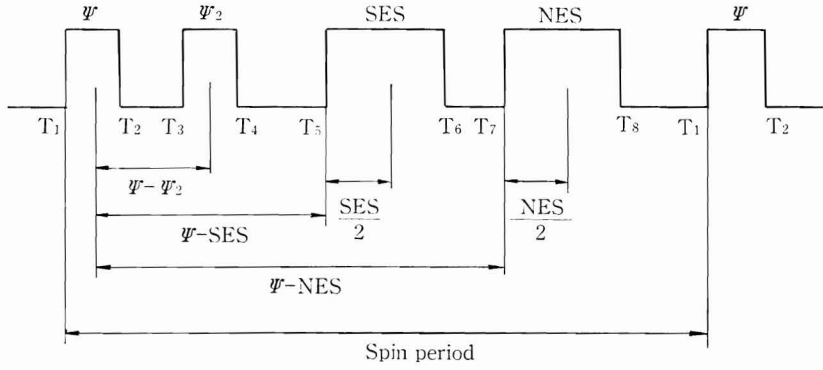


Fig. 1 Sensor pulse data.

X_6 : η_1 のミスアライメント

・タイプ 3

$$y_3 = \frac{NES}{2} = \left(\frac{T_8 - T_1}{2} \right) \times \frac{2\pi}{T_1} \quad (67)$$

$$e_N = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{r_0^2 - r_e^2} - \cos \phi_e \cos (\eta_2 + X_7)}{r_0 \sin (\eta_2 + X_7) \sin \phi_e} \right\} \quad (68)$$

ここで η_2 : NES 取付け位置のスピンの軸からの仰角方向角度 (95°)

X_7 : η_2 のミスアライメント

・タイプ 4

$$y_4 = \Psi - SES = \left(T_5 - \frac{T_2}{2} \right) \times \frac{2\pi}{T_1} \quad (69)$$

$$\Psi_4 = MOD[\lambda + X_8 - e_s, 2\pi] \quad (70)$$

$$\lambda = \lambda_r + \lambda_s + 2\pi \quad (71)$$

ここで $\lambda_r = \tan^{-1} \left\{ \frac{\vec{d}(\vec{s} \times \vec{\partial})}{\vec{\partial} \cdot \vec{s} - (\vec{\partial} \cdot \vec{d})(\vec{s} \cdot \vec{d})} \right\}$: Ψ センサ

が太陽をセンスしてから地球中心をセンスするまでにスピンの軸の回転する角度 (ダイヘドラル角)

$\vec{\partial}$: 衛星から地心方向ベクトル

λ_s : Ψ センサと SES の方位角方向取付角 (-12.5°)

X_8 : SES の方位角方向ミスアライメント

・タイプ 5

$$y_5 = \Psi - NES = \left(T_7 - \frac{T_2}{2} \right) \times \frac{2\pi}{T_1} \quad (72)$$

$$\Psi_5 = MOD[\lambda + X_9 - e_N + R, 2\pi] \quad (73)$$

ここで X_9 : NES の方位角方向ミスアライメント

R : SES と NES の方位角方向取付角 (45°)

5.2 VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 観測式

VISSR 画像データから抽出されたランドマークデータを用いて姿勢決定する場合、姿勢状態と VISSR 画像上のランドマークの位置とを関連付ける方程式が VISSR 観測式である。これはランドマークと衛星とを結ぶ単位ベクトルと VISSR の視線ベクトルとがある座標に於て等しいと置くことにより求められる。

5.2.1 衛星からランドマークを望む単位ベクトル (Fig. 2)

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}_l - \vec{r}_s}{|\vec{r}_l - \vec{r}_s|} \quad (74)$$

ここで \vec{r}_s : 衛星位置ベクトル

\vec{r}_l : ランドマーク位置ベクトル

\vec{r}_l を \vec{r}_s が決められる 1950.0 年の平均赤道座標で表わすには次の式による

$$\vec{r}_l = N \begin{pmatrix} \cos \theta_g & -\sin \theta_g & 0 \\ \sin \theta_g & \cos \theta_g & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G_1 \cos \phi \\ 0 \\ G_2 \sin \phi \end{pmatrix} \quad (75)$$

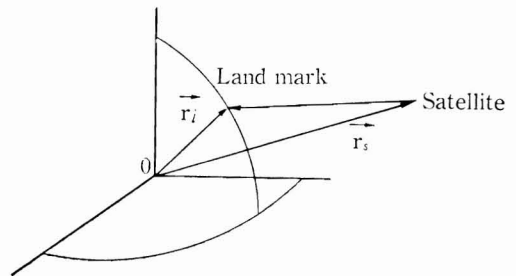


Fig. 2 Landmark vector

ここで N : 真の赤道面座標から1950.0年の平均赤道面座標へ変換する才差章動行列

θ_g : ランドマーク観測時の真恒星時

λ : ランドマークの経度

$$G_1 = \frac{a_e}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \phi}} + H \quad (76)$$

$$G_2 = \frac{a_e(1-e^2)}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \phi}} + H \quad (77)$$

a_e : 赤道半径

ϕ : 測地緯度

e : 離心率

H : ランドマークの海拔

5.2.2 衛星角運動量座標における視準線ベクトル

(Fig. 3)

X 軸上にある視準線ベクトルを Y 軸のまわりにVISSRミラーのステッピング方向に P_i 角だけ回転したベクトルを \vec{L}_i とすると

$$L_i = \begin{pmatrix} \cos P_i & 0 & -\sin P_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin P_i & 0 & \cos P_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (78)$$

ここで $P_i = P(i - i_c)$

P : ライン方向瞬時視野角

i : ランドマークの画像ライン位置

i_c : 画像ライン中心位置

\vec{L}_i を X 軸および Y 軸まわりのミスアライメントにより回転させて \vec{L}_M を求める。この時の回転角はそれぞれ

負の方向にとる

$$\vec{L}_M = \begin{pmatrix} \cos \delta_Y & 0 & -\sin \delta_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta_Y & 0 & \cos \delta_Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_X & \sin \delta_X \\ 0 & -\sin \delta_X & \cos \delta_X \end{pmatrix} L_i \quad (79)$$

$$= M \vec{L}_i$$

ここで M : ミスアライメント行列 $\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}$

最後に \vec{L}_M を走査方向に回転させる等衛星角運動量座標における視準線ベクトル \vec{L} となる

$$\vec{L} = \begin{pmatrix} \cos q_j & -\sin q_j & 0 \\ \sin q_j & \cos q_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \vec{L}_M \quad (80)$$

ここで $q_j = q(j - j_c)$

q : 画素方向瞬時視野角

j : ランドマークの画像画素位置

j_c : 画像画素中心位置

座標系のところで述べた慣性座標への変換式を用いると地表面上の点と画像上の点との対応の式として次の様な式が得られる

$$\frac{\vec{r}_l - \vec{r}_s}{|\vec{r}_l - \vec{r}_s|} = (\delta_x, \delta_y, \delta_p) \vec{L} \quad (81)$$

5.2.3 VISSR 観測式

精姿勢処理では観測される量は画像上のランドマーク位置 (i, j) であるから、これに対する計算値は姿勢情報から画像上のランドマーク位置として計算される。これは上記観測式を i と j について解いて得られる

$$i = \frac{\sin^{-1}(\alpha_s)}{P} + i_c \quad (82)$$

$$j = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\beta_s}{\beta_c}\right)}{q} + j_c \quad (83)$$

慣性座標における \vec{r} を衛星角運動量座標のベクトルに変換したベクトルを \vec{b} とすると

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = (\delta_x, \delta_y, \delta_p) \vec{r} \frac{r_l - r_s}{|r_l - r_s|} \quad (84)$$

$$\alpha_s = \frac{b_3 m_{33} - m_{31} \sqrt{m_{31}^2 + m_{33}^2 - b_3^2}}{m_{31}^2 + m_{33}^2}$$

$$\beta_c = \frac{\begin{vmatrix} b_1 & - (m_{21} \alpha_c + m_{23} \alpha_s) \\ b_2 & m_{11} \alpha_c + m_{13} \alpha_s \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} m_{11} \alpha_c + m_{13} \alpha_s & - (m_{21} \alpha_c + m_{23} \alpha_s) \\ m_{21} \alpha_c + m_{23} \alpha_s & m_{11} \alpha_c + m_{13} \alpha_s \end{vmatrix}}$$

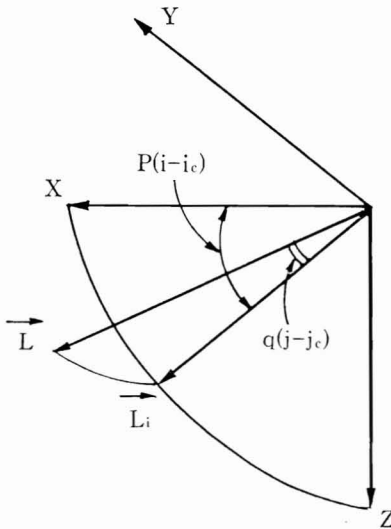


Fig. 3 Vector of line of sight.

$$\beta_s = \frac{\begin{vmatrix} m_{11}\alpha_c + m_{13}\alpha_s & b_1 \\ m_{21}\alpha_c + m_{23}\alpha_s & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} m_{11}\alpha_c + m_{13}\alpha_s & - (m_{21}\alpha_c + m_{23}\alpha_s) \\ m_{21}\alpha_c + m_{23}\alpha_s & m_{11}\alpha_c + m_{13}\alpha_s \end{vmatrix}}$$

$$\alpha_c = \sqrt{1 - \alpha_s^2}$$

5.3 偏微分係数

推定理論で述べた様に非線形の観測式を線形化するために、観測式を推定および考慮パラメータで偏微分する。ここでは1例として粗姿勢のタイプ1の観測式に対する偏微分係数を示す。

$$\frac{\partial C_\phi}{\partial X_1} = \frac{S_x - \frac{S_2 X_1}{\sqrt{1 - (X_1^2 + X_2^2)}}}{\cot \xi \sin \phi \sin^2(\phi + X_5) \sqrt{1 - \tan^2 \xi \cot^2(\phi + X_5)}} \quad (85)$$

$$\frac{\partial C_\phi}{\partial X_2} = \frac{S_y - \frac{S_2 X_2}{\sqrt{1 - (X_1^2 + X_2^2)}}}{\cot \xi \sin \phi \sin^2(\phi + X_5) \sqrt{1 - \tan^2 \xi \cot^2(\phi + X_5)}} \quad (86)$$

$$\frac{\partial C_\phi}{\partial X_3} = \frac{\partial C_\phi}{\partial X_4} = 0 \quad (87)$$

$$\frac{\partial C_\phi}{\partial X_5} = \frac{-1}{\sin(\phi + X_5) \sqrt{\cot^2 \xi \sin^2(\phi + X_5) - \cos^2(\phi + X_5)}} \quad (88)$$

$$\frac{\partial C_\phi}{\partial X_6} = \frac{\partial C_\phi}{\partial X_7} = \frac{\partial C_\phi}{\partial X_8} = \frac{\partial C_\phi}{\partial X_9} = 0 \quad (89)$$

6. ランドマーク抽出

VISSR 画像中から地球上の緯度経度が既知のランドマークと同じパターンを捜し、VISSR 画像上の位置 (i, j) と地球上の緯度経度 (φ, λ) の対応を求めるのが、ランドマーク抽出である。

これはまず VISSR 画像中からランドマークが写っていると思われる領域 (サーチエリア) を切り出し、そのサーチエリア上にテンプレートを重ねる。テンプレートをサーチエリアに重ねる状況を Fig. 4 に示す、テンプレートをサーチエリアの端から端まで縦横に移動させ、そのパターンが一番びったり合致している位置を見出す。このパターンが最も類似しているとう基準を「画像ベクトル」の方向の一致度に置く。画像ベクトルとは

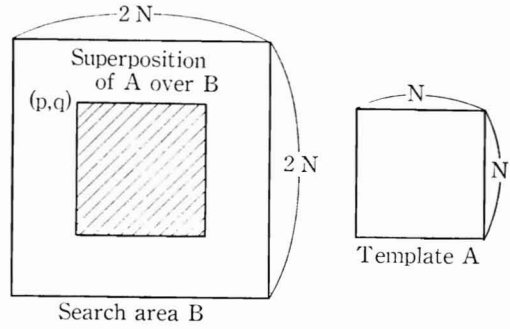


Fig. 4 Template and search area.

サーチエリアの画像マトリックスの各画素の輝度をベクトルの要素の値に対応づけたものである。

この様にある画像中からある特徴を持つパターンを抽出することをパターンマッチングといい、姿勢データ処理ではそのひとつの手法であるクロスコレーション法を用いている。

サーチエリアとテンプレートの2つのベクトル間の余弦をとり、これを相関係数という。

相関係数の定義は下式で与えられる

$$C_{p,q} = \frac{\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N (b_{k+p,l+q} - \bar{b}_{p,q})(a_{k,l} - \bar{a})}{\sqrt{\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N (b_{k+p,l+q} - \bar{b}_{p,q})^2 \times \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N (a_{k,l} - \bar{a})^2}} \quad (90)$$

ここで $p, q = 0, 1, 2, \dots, N$

$a_{k,l}$; テンプレート A の要素

\bar{a} ; テンプレート A の要素の平均値

$b_{k+p-1,l+q-1}$; A を重ねられたサーチエリア B の要素

$\bar{b}_{p,q}$; A を重ねられた B の要素の平均値

上記の相関係数の定義式を次式の様に変形し、この式をパターンマッチング系ルーチンの基本式としている。

$$C_{p,q} = \frac{\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N (a_{k,l} b_{k+p,l+q}) - N^2 \bar{a} \bar{b}_{p,q}}{\sqrt{\left(\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N a_{k,l}^2 - N^2 \bar{a}^2\right) \left(\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N b_{k+p,l+q}^2 - N^2 \bar{b}_{p,q}^2\right)}} \quad (91)$$

この計算を全ての (p, q) について直接計算すると非常に計算時間がかかる。そこで $C_{p,q}$ の分子の「たたみ込み」の計算を高速フーリエ変換 (FFT) を用いて行なう。2つのベクトルのたたみ込みはそれらのベクトルを

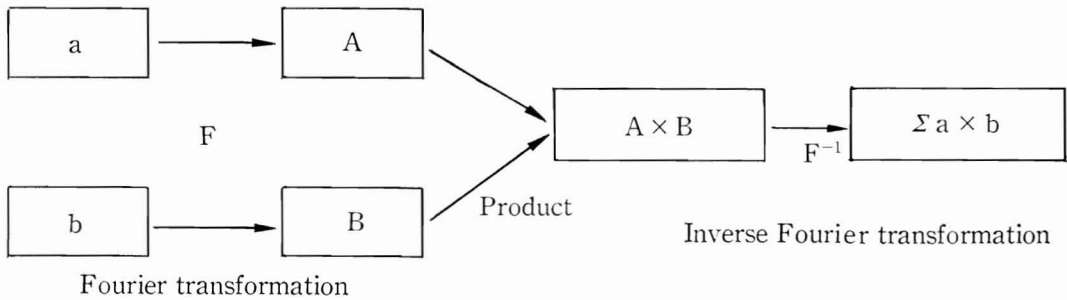


Fig. 5 Convolution using Fourier transformation.

フーリエ変換したものの積の逆フーリエ変換に等しい、という性質を利用し、フーリエ変換の部分をFFTで行なうことになる。Fig. 5はフーリエ変換及び逆フーリエ変換の流れを示す。

FFTの詳細は「第II-2部、第3節 風計算」の項を参照されたい。

7. 決定論処理論

センサデータを用いた姿勢データ処理は通常今まで述べた推定理論を用いるが、どうしても推定処理が出来ない様な悪いデータが多い場合、一組のセンサパルスのデータで姿勢を求め、もっともらしいいくつかの姿勢データをフィッティングして姿勢を決定する「決定論処理」を姿勢データ処理のバックアップ的処理機能としてもっている。

5.1のセンサ観測式で記述した5種類の回転角を用いて、スピン軸と太陽方向およびスピン軸と地心方向の2種類の円錐角(コーンアングル)とこの3つの方向から算出する二面角(ダイヘドラルアングル)を求め、これ等の交点としてスピン軸ベクトルを決定する。スピン軸ベクトルからスピン軸の赤経赤緯を算出し、この値を時系列に並べて最小自乗法でフィッティングパラメータを求め、偏差値によって不良データを棄却し、良データのみで再度フィッティングして、姿勢を決定する。

7.1 コーンアングル

コーンアングル θ は、スピン軸方向単位ベクトル \vec{a} と既知の単位ベクトル \vec{U} とのなす角である。ひとつのコーンアングルの大きさは \vec{U} についてのコーンアングルを生成角とするコーン上に \vec{a} があることを決める。

$$\theta = \cos^{-1}(\vec{U} \cdot \vec{a})$$

スピン軸と太陽方向のコーンアングル ϕ はタイプ1のセンサ観測式から

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \xi}{\sin(\phi - \phi_s)}\right) - X_5 \quad (91)$$

スピン軸と地心方向のコーンアングル ϕ_e はタイプ2とタイプ3のセンサ観測式から

$$\phi_e = \cos^{-1}\left\{ \frac{\frac{\sqrt{r_0^2 - r_e^2}}{r_0} \{ \cos e_s \sin(\gamma_1 + X_6) - \cos e_N \sin(\gamma_2 + X_7) \}}{\cos^{-1} e_s \sin(\gamma_1 + X_6) \cos(\gamma_2 + X_7) \cos(\gamma_1 + X_6)} \right\} \quad (92)$$

7.2 ダイヘドラルアングル

ダイヘドラルアングル β は2つの面のなす角度である。タイプ4とタイプ5のセンサ計算式から

$$\beta = \psi_4 - X_8 + e_s - \lambda_s \quad (93)$$

8. 処理方式

Fig. 6に姿勢データ処理の流れ図を示した、1の処理システムで既述したように姿勢データ処理は「姿勢決定予測処理プログラム」と「ランドマーク抽出プログラム」の2つの大きなプログラムとテンプレートファイルを作成するためのプログラムとして「テンプレート画像作成プログラム」と「テンプレートファイル作成プログラム」とがある。この節では各プログラムの処理方式について述べる。

8.1 姿勢決定予測処理プログラム

このプログラムは次の9つのモジュールから成り立っている

- 1) 制御処理
- 2) 初期設定処理
- 3) センサ前処理
- 4) 推定処理

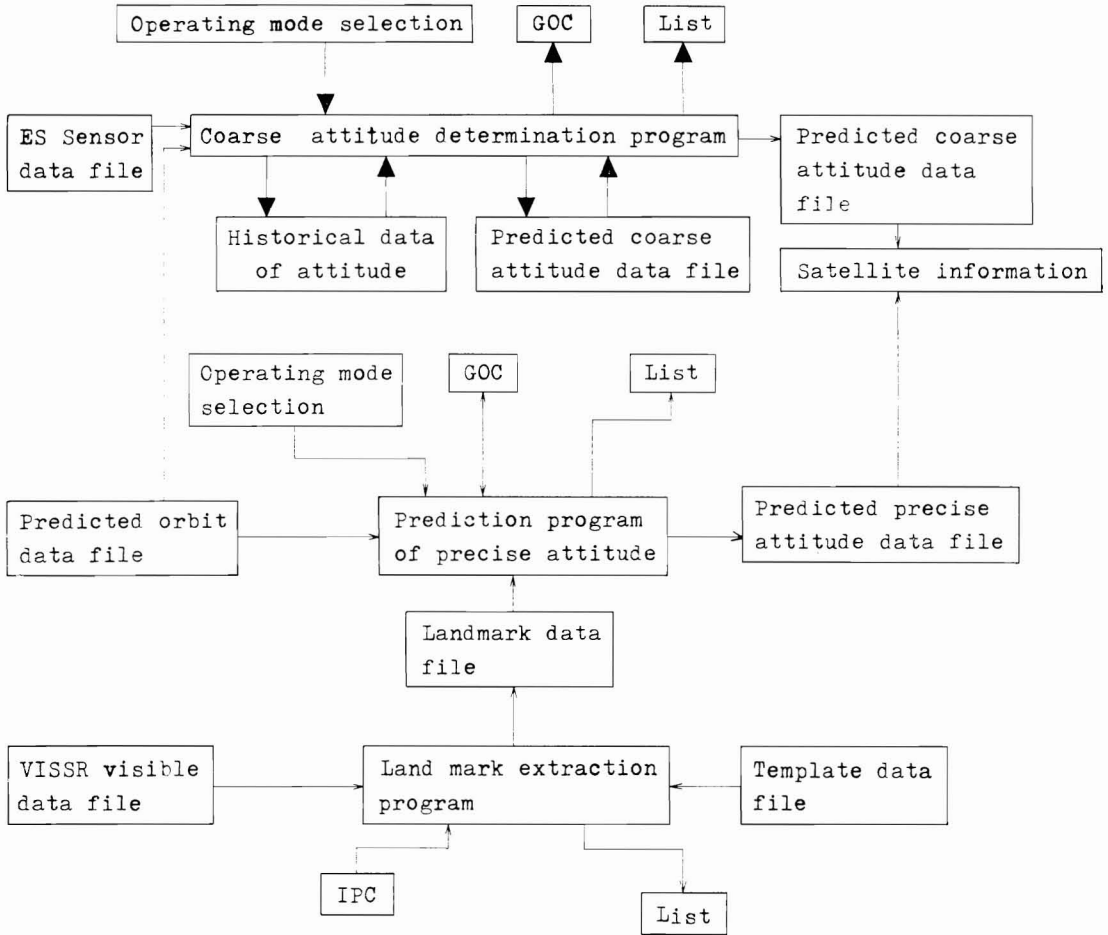


Fig. 6 Attitude data processing.

- 5) 元期更新処理
- 6) 誤差伝搬処理
- 7) 予測処理
- 8) 姿勢決定代替処理
- 9) 決定論処理

8.1.1 制御処理方式

制御モジュールは姿勢決定予測をするために、処理の流れを制御する。

姿勢決定の機能を制御する媒体としてキャラクターディスプレイ装置 (GOC コンソール) とカード入力装置があり、通常は GOC を使用する「CD モード」で処理が行なわれる。初期設定や処理実行条件がほとんどマンマシン処理を必要としなくなる時期ではカードで入力してエラー処理が必要な時だけ GOC を使用する「CR モード」を考えている。また GOC が故障した時のために「CD ダウンモード」も用意されている。これ等 2 つの制

御媒体により「S.Q カルマンモード」, 「代替処理モード」および「決定論処理モード」のいずれかを選択するようになっている。

「S.Q カルマン」の場合の制御方式は、まず初期設定モジュールを呼び、初期設定の結果 予測ファイルを作成するか否かにより予測モジュールのための制御情報を設定する。もし予測処理のみを実行する場合は初期設定のあとに続いて予測モジュールを呼び出す。初期設定により粗姿勢決定を指定された場合には前処理モジュールを呼び、精姿勢決定の場合には前処理をとばすよう制御する。

前処理に対する制御が終ると元期更新モジュール、推定モジュールと処理を進め「CD ダウンモード」以外のモードでは推定結果を GOC に表示し、結果が良ければ予測ファイルを作成するために元期更新モジュール、誤差伝搬モジュール、予測モジュールと処理を進める。推

定結果が悪い場合には予測ファイルを作成しないように制御情報を設定する。これは粗姿勢の場合元期後7日間、精姿勢の場合元期後4日間の予測データを前回の処理で既に作成してあり、予測ファイルを悪いデータによってこわしてしまうことを避けるためである。

また初期設定で推定処理だけをするように指定を受けた場合は誤差伝搬の処理まで行なって処理を中止する。

このように初期設定モジュールから予測モジュールまで制御するのが「S. Q カルマン」の場合の制御である。また「CD モード」の場合はモード選択画面で「STOP」のキーボード入力コマンドを出すまで繰返し処理を実行できるようになっている。

「代替処理」の制御方式は、モード選択画面でこの処理が指定されると姿勢決定代替処理を呼び出し、推定結果が良い場合はGOCでマンマシン処理をして「S. Q カルマン」の予測モジュールを呼び出すようになっていく。

「決定論処理」の制御方式は、モード選択画面でこの処理の指定を受けた後決定論処理を呼び出し、処理が終了するとモード選択画面に戻る。

8.1.2 初期設定処理方式

初期設定モジュールは「S. Q カルマン」による姿勢決定予測処理の制御モジュールから呼ばれ、その制御情報入力媒体指定カードにより、CD モード、CR モード、CD ダウンモードの各モードに従って実行条件とパラメータ条件を設定する。

実行条件画面で指定したり変更したりする項目は次のとおりである。

- 使用データ=センサデータかランドマークのデータかもしくは両方のデータを同時使用
- 決定時共分散ファイル=使用か使用しないか。
- 処理の選択=推定のみ、予測のみ、推定と予測、推定と予測で予測ファイルは作成しない、予測のみで予測ファイルは作成しない
- LP (Line Printer) 出力レベル=初期設定結果、データ、推定・誤差伝搬・予測の結果の出力レベル（どの程度の量を出力するか）を指定する
- 偏微係数計算方法=解析的に計算するか数値的に計算するかを指定する
- 反復計算の収束基準=4種類の収束基準それぞれの値を指定する
- LP 出力時の元期指定=LP に出力する推定結果の元期を指定する。推定処理の元期は最終データ直後の0時 (GMT) に固定されている。
- 姿勢モデル=平均技法か多項式モデルか更に多項式

の場合は次数を指定する

- ES (Earth and Sun) センサデータ処理のマンマシン=ES センサデータ前処理の際マンマシン処理をするかどうか指定する

- 推定後のマンマシン=推定処理の後マンマシン処理をするかどうか指定する

パラメータ条件画面で指定したり変更したりする項目は次のとおり

- 前回元期=初期設定するパラメータの元期を指定する

- パラメータ状態=推定処理でそのパラメータを推定するか考慮するかあるいは無視するかを指定する。考慮パラメータについては 3.6 参照

- パラメータの値=前回元期のパラメータの値が表示されるが必要に応じて修正できる

- パラメータの共分散=パラメータの共分散が表示されるが必要に応じて修正できる

ここで姿勢データ処理で用いるパラメータを列記すると次の20パラメータである。

- 1) 平均技法モデル X方向余弦
- 2) " Y方向余弦
- 3) " 太陽放射圧トルク
- 4) " 太陽放射圧トルクスピード
- 5) 多項式モデル α_R アングル
- 6) " α_R スピード
- 7) " α_R アクセル
- 8) " α_R ジャーク
- 9) " $\hat{\sigma}_R$ アングル
- 10) " $\hat{\sigma}_R$ スピード
- 11) " $\hat{\sigma}_R$ アクセル
- 12) " $\hat{\sigma}_R$ ジャーク
- 13) センサコーンアングルバイアス誤差
- 14) 南側アースセンサ取付垂直誤差
- 15) 北側 "
- 16) 南側アースセンサ取付水平誤差
- 17) 北側 "
- 18) VISSR X 軸ミスアライメント
- 19) VISSR Y 軸ミスアライメント
- 20) VISSR ベータ角バイアス誤差

初期設定モジュールでは上記実行条件、パラメータ条件の設定の他精姿勢処理の場合はランドマークデータの前処理と推定処理のためのコレスキー分解行列の作成も行なう。

ランドマークデータの前処理はランドマーク抽出処理

の結果を推定処理に入力するためセンサデータ前処理結果と同様の形に変換するために行なう。

8.1.3 センサ前処理方式

衛星から送られてくるリアルタイムテレメトリデータの中からセンサデータを取り出した ES センサファイルのデータを、センサ観測式の5つのタイプの物理量センサデータに変換して出力する (前処理済センサファイル)。

この変換時に平滑化処理を行ない不良データを棄却する。棄却の方法は算術平均および多項式フィッティング (0次～3次) パラメータを求めこれにより偏差値 (RMS) を求めデータの良否判定を行なう。この際フィッティング次数, 1回のフィッティングに使用するデータの数 (6～100), 不良データの棄却レベル (RMS に乗ずる係数), データ有効時間帯のそれぞれに対し GOC コンソールを用いてマンマシン処理が行なえるようになっている。

この他センサ前処理ではサンセンサパルスの立ち上りデータから平均スピンドットの算出, また蝕時の場合はアースセンサデータの LP 出力を行なう。

8.1.4 推定処理方式

推定モジュールは, 前処理済センサデータおよび前処理済ランドマークデータを用いて, 姿勢状態 (平均技法モデルでは方向余弦と太陽放射圧トルク定数, 多項式モデルでは係数の各パラメータ), センサ取付けに関する5つのミスアライメントパラメータ, VISSR の取付けに関する2つのミスアライメントパラメータとベータ角バイアス誤差パラメータ (用いた各 VISSR 画像毎) を推定する。

元期に於る推定パラメータ値による観測式の偏微分係数の計算や反復計算の収束判定など推定モジュール内での計算については3の推定理論を参照。

推定結果は GOC に表示されるが表示内容は姿勢モデル, データ種類, 各パラメータの初期値, 推定値, 標準偏差等である。マンマシン処理としては, 再実行の指示, 予測ファイル作成, 予測はするが予測ファイル作成せず, モード選択画面への戻り, のコマンド指示がある。

8.1.5 元期更新処理方式

元期更新処理は最終データ時刻より新しい元期を設定し, 前回元期の状態および共分散行列を推定のアプリオリとなるように新しい元期にマップする処理である。

まず新しい元期を最終データ時刻以後の0時 (GMT) に設定する。次に前回元期の状態と共分散行列を用い各運動モデルに従った遷移行列を計算し遷移させる。

8.1.6 誤差伝搬処理方式

誤差伝搬モジュールは推定モジュールで求められた各推定パラメータの共分散行列から, 誤差伝搬式を用いて前処理済センサデータ, ランドマークデータの推定時の誤差量を計算する。この処理の目的は姿勢推定の精度を評価するためである。

誤差伝搬式は次の様に誘導する。

線形化した観測式を次式とする

$$\bar{z} = H\bar{X} \quad (94)$$

ここで \bar{z} ; 観測値ベクトル

H ; 観測行列 (偏微分係数行列)

\bar{X} ; 状態ベクトル

\bar{X} の共分散行列 P が求められているとすると \bar{z} の分散, 即ち各観測値の誤差 Δz は

$$\begin{aligned} \Delta z &= E[(H\bar{X})(H\bar{X})^T] - E[H\bar{X}]E[H\bar{X}]^T \\ &= HE[\bar{X}\bar{X}^T]H^T - HE[\bar{X}]E[\bar{X}]^T H^T \\ &= H\{E[\bar{X}\bar{X}^T] - E[\bar{X}]E[\bar{X}]^T\}H^T \\ &= HPH^T \end{aligned} \quad (95)$$

$E[A]$; 変数 (ベクトル, 行列など) の期待値

ところで状態ベクトルに状態遷移がある場合には状態遷移行列 Φ を用いて次の様に観測行列を補正する

$$H' = H\Phi$$

従って誤差伝搬処理で用いる誤差伝搬式は

$$\Delta z = H\Phi P\Phi^T H^T$$

となる。

8.1.7 予測処理方式

姿勢予測は姿勢元期1日前から, 粗姿勢では8日間, 精姿勢では5日間5分間隔で予測する。

まず元期1日前に姿勢の状態パラメータを遷移する。

平均技法モデルの場合は (57) 式で与えられた微分方程式を5分間隔で8次のルンゲ・クッタ法で積分してスピンドット方向単位ベクトルを得る。

多項式モデルの場合は (60), (61) 式で与えられた多項式の時刻 t を順次5分ずつ加えた値で計算する。

8.1.8 姿勢決定代替処理方式

代替処理はリアルタイムテレメトリデータ受信異常, オンライン系計算機障害等で数日にわたって粗姿勢処理が実行出来ないような場合に, 時前共分散がなくても, 少数のセンサデータでも, あるいは軌道データ処理が実行出来なかった場合にも姿勢データ処理を行なうバックアップ機能を持つ処理である。更に ES センサファイル異常等でオンライン系計算機にセンサデータがない場合

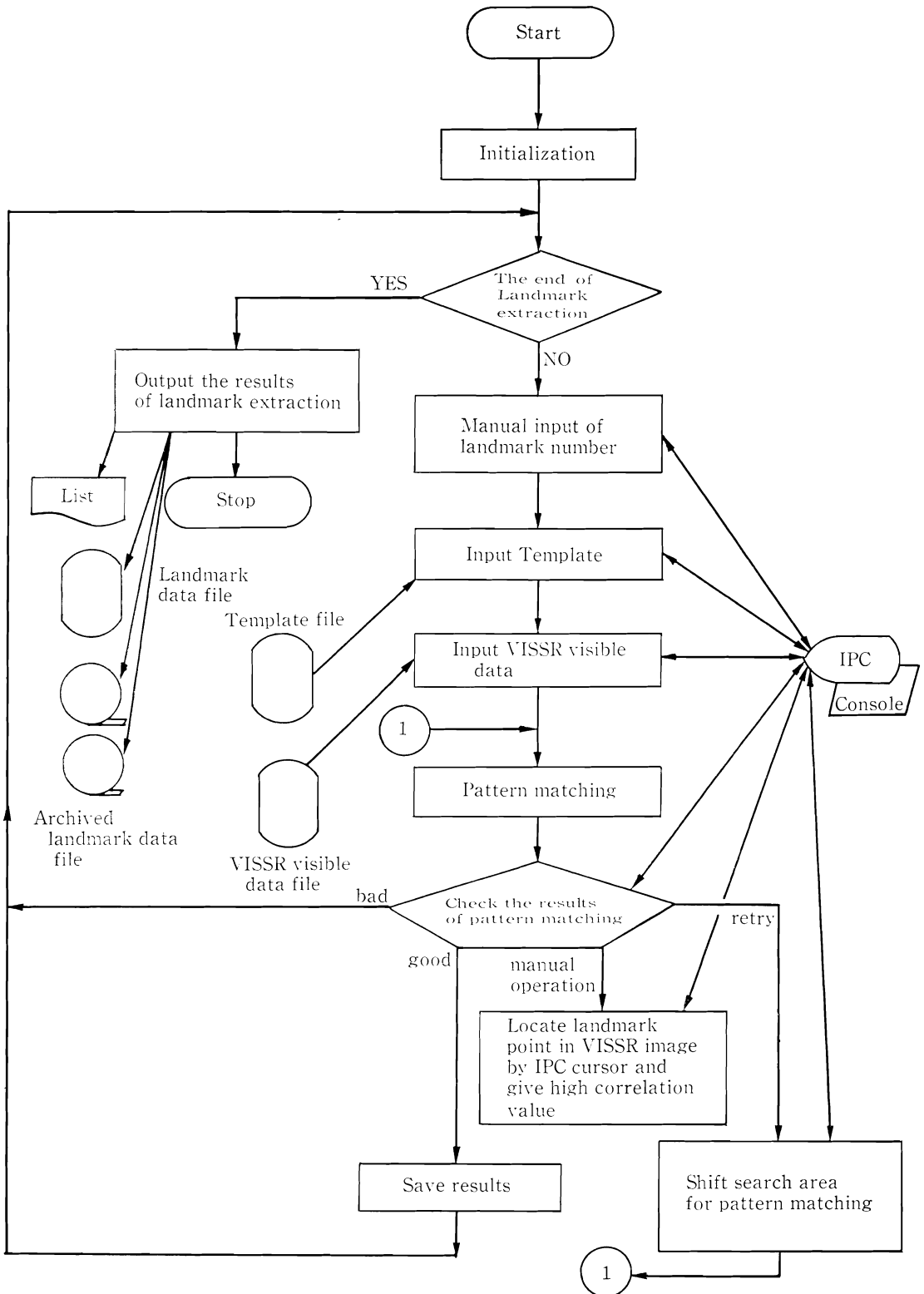


Fig. 7 Flow diagram for landmark extraction.

にセンサデータをカードで入力して処理する機能も有している。

制御処理方式で述べたようにこの処理は通常の姿勢データ処理とは独立して処理が行なえる特徴をもつ。

この処理のセンサ前処理に相当する処理は通常の場合の100個位のデータのスムージングではなしに、1, 2, 3, 4, 6, 12のいずれかの数のデータでスムージングし、その代表値の最大数は200である。

推定方式は推定理論で述べた様にプロセスノイズまでは考慮しない非線形フィルタリングである。通常は時前共分散のデータも使用しない。

運動方程式の積分も既述したように数値的な積分方式でなく解析的な計算方式を用いている。

この処理は独自に衛星位置情報作成機能を有しており軌道要素をカードで入力すると姿勢データ処理で用いる位置情報を計算している。

通常はこの処理を用いる時は推定結果を見るのが目的であるが推定結果が良い場合には S. Q. カルマンモードの処理の予測処理につなぐことも出来るようになっている。

8.1.9 決定論処理方式

この処理は前項の代替処理よりも更に状態が悪く、良さそうなセンサデータがわずかな場合に姿勢状態を決定出来るようなバックアップ機能を有する処理である。

決定論処理理論で述べた様に各スピン周期のセンサデータからそれぞれスピン軸方向を決定して、もっともらしいそれ等データをスムージングして姿勢状態を決定している。

従ってこの処理終了後オペレータの判断なしに姿勢予測データファイルを作成することは避けている。

8.2 ランドマーク抽出プログラム

ランドマーク抽出処理は2つの流れがある。(Fig. 7 参照) ひとつは論理的な流れを「ロックテーブル」で制御し、ほぼ自動的にランドマーク抽出する流れと、もうひとつは「ロックテーブル」を設けずにオペレータの自由な意志でマッチングを取るマニュアル的な処理である。通常は自動的な処理を進めるが衛星制御直後等特殊な場合、前回の姿勢予測データあるいは軌道情報が悪く画面の表示が希望する場所からずれているような場合はマニュアル処理を行なう。

またランドマーク抽出は約100個のランドマーク候補地のうち雲におおわれていない地点を選んで処理を進めるが、最も良いランドマークを採用するために不良のランドマークデータを削除する機能を有している。

VISSR 画像から切り出したサーチエリアとテンプレ

ートとのマッチングをとる時、雲の輝度レベルが海陸の輝度レベルに比べて著しく高いとマッチングに悪い影響を与える。また海と陸の輝度レベルのコントラストが弱いとマッチングの相関値の最大値付近の尖鋭度が小さくなりマッチングの感度が劣化する。この2つの問題を解決するために画像データの輝度の階調変換を行なう。

マッチング結果採用に至るまでの過程は3つある。ひとつはパターンマッチングの結果が良くそのまま採用する過程であり、その2つ目はマッチング結果が悪いのでサーチエリアの切り出しをやり直して再びパターンマッチングをとって良い結果を得る過程である。3つ目はサーチエリアの切り出しをやり直してもマッチング結果が悪いが、どうしてもそのランドマークのデータが必要な場合にオペレータがマッチングのポイントを定めてマッチング結果として採用する過程である。

このようにして得られたランドマークの観測値データは処理終了を指令すると VISSR が走査した順序に配列されて観測値ファイルに出力される。

この観測値データの加重の方法はクロスコリレーションの値が用いられる。

8.3 テンプレート画像作成プログラム

50万分の1の地図を用いて海岸線を主としてランドマークを選定し、海陸を白黒の2階調で分けたテンプレート用の画像を作る。このテンプレートデータの中心位置(ランドマーク位置) (φ, λ) をノミナルな衛星位置と姿勢によって VISSR 画像座標の (i, j) に変換する。

可視画像の 64×64 画素の領域(マッチングエリア)と 128×128 画素の領域(画像処理コンソール表示用エリア)のテンプレート画像データを作成し、テンプレート画像ファイルに出力する。

8.4 テンプレートファイル作成プログラム

現在 GMS 用にテンプレートデータは約120個用意されているがこのうちの99個を選んでテンプレートファイルに用意している。このテンプレートファイルには各ランドマークのテンプレートに対する緯経線、海岸線のデータが「共通ルーチン」で用意したそれぞれのマスターファイルから切り出してきて画像処理コンソールへの表示用として準備されている。

9. 他業務処理とのインターフェイス

姿勢データ処理が直接インターフェイスをもつ業務は軌道データ処理、データ集配信処理、画像準備処理の3つである。

衛星から送られてくるリアルタイムテレメトリのうちセンサデータを1日8回、1回10分間づつ累積してパッ

チ系計算機へのデータインターフェイスをとる共用ファイルに書き込むのはデータ集配処理である。CDASのリアルタイムテレメトリ復調器段階での Q/C (Quality Check), オンライン系計算機入力段階での Q/C の他センサデータが日照時のものが蝕時のものかの区別フラグもつけている。

またこの処理は衛星制御直後の処理用に連続80分間のデータをファイルに書き込む機能も有している。

軌道データ処理からは衛星の位置情報の他太陽や月など天体暦データ, 1950.0年の慣性座標から TRUE OF DATE 慣性座標への座標変換行列などをバッチ系の軌道予測ファイルを通して得ている。

またこの処理が有している共用ファイルからオンライン系計算機へのファイルコピーの機能を使って姿勢データ処理が作成した共用ファイル上の粗姿勢予測および精姿勢予測のデータをオンライン系の画像一次処理へ渡している。

従って画像一次処理とは直接インターフェイスをとっていないが, 画像一次処理の「S/DB (Synchronizer Data Buffer) 運用情報作成」用には S/DB を衛星の VISSR 撮像 タイミングに合わせるための「 β 角情報」を渡している。また FAX 作成や VISSR 履歴データの関連情報作成用の座標変換に必要な姿勢データ, VISSR ミスアライメントデータ等も共用ファイルを通して渡している。

これとは逆に S/DB の運用データ (実際に用いた β 角情報等), VISSR 画像データ受信処理時に画像一次処理で用いた姿勢関係の情報は「VISSR 履歴 MT」を通して画像準備処理から得ている。

精姿勢予測データの場合には姿勢データ処理を行なうバッチ系計算機のファイルにはデータが保存してなく, 共用ファイル→オンライン系精姿勢予測ファイル→画像一次処理内ファイル→VISSR 履歴 MT→画像準備処理内ファイル→姿勢データ処理, というデータの流れかたをする。

画像準備処理は上記のデータ受渡しその他, ランドマーク抽出処理で用いる画像処理 コンソール上への表示用に, 全球画像, ランドマーク指定用画面に用いる16分割画像, テンプレートとマッチングをとるランドマーク周辺画面に用いる区分画像の各画像データを作成している。

References

Hughes Aircraft Company, 1975: Attitude Determination Program Users Guide for GMS. Vol.

1 p. 21~2-36.

付録 座標系

1. 慣性座標系

原点 地心

Z軸 地軸方向

X軸 春分点方向

姿勢データ処理の基準座標系である。(Fig. 8) 原点を衛星の質量中心とした場合は衛星慣性座標という。姿勢はこの座標でのスピンの軸ベクトルの赤経 α と赤緯 δ で表わす。

慣性座標系は地球の自転軸の才差, 章動運動による春分点方向の変化から次の3つの座標系がある。

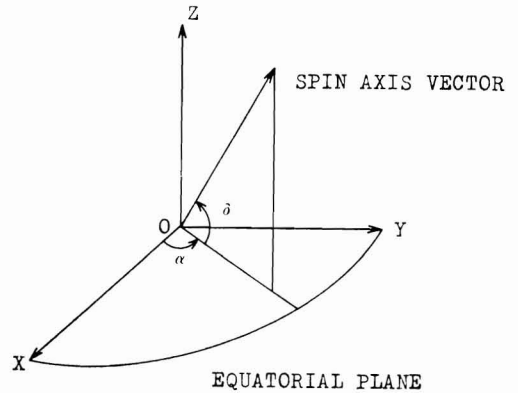


Fig. 8 Inertial coordinate system.

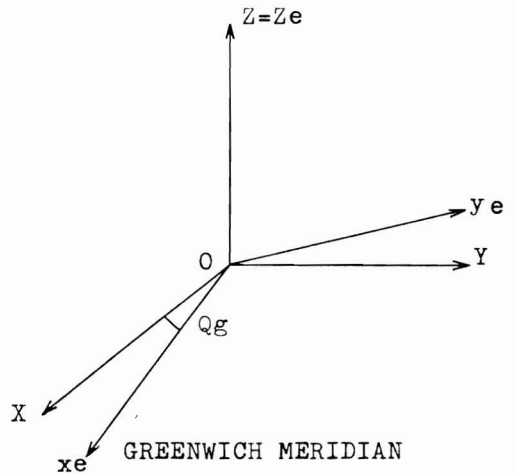


Fig. 9 Latitude longitude coordinate system.

1.1 1950.0年慣性座標系

1950年の年初における平均春分点方向を基準とする。平均春分点とは才差分だけを考慮した春分点で章動まで考慮した春分点は真春分点という。

軌道計算をこの座標で行っており姿勢データ処理で軌道に関する計算を行なう時に用いる。

1.2 MEAN OF DATE 慣性座標系

解析元期 (エポック) における平均春分点方向を基準とする。

NASDA の姿勢情報の出力座標である。

1.3 TRUE OF DATE 慣性座標系

エポックにおける真春分点方向を基準とする。

後述の地球固定座標系と1950.0年慣性座標系との仲介や姿勢情報の出力座標である。慣性座標を $(X, Y, Z)^T$ とする。

2. 地球固定座標系 (Fig. 9)

原点 地心

Z軸 地軸方向

X軸 グリニッジ子午線方向

衛星の運動を観測局からの実際のデータと結びつけた地球の非球性による摂動力を計算したりする際に用いる地球と共に回転する座標系。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_g & -\sin \theta_g & 0 \\ \sin \theta_g & \cos \theta_g & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix}$$

3. 測地学的座標系 (Fig. 10)

地球の形のモデルとして ある 偏平率 f をもつ回転楕円体を採用し (スミソアン物理天文台C-7系), この回転楕円体をもとに緯度 ϕ , 経度 λ , 高度 h を要素とする座標系で, 地球上の位置を地球固定座標系に結びつける際に用いる。

$$\begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \phi \sin \lambda \\ \{N(1-e^2)+h\} \sin \phi \end{pmatrix}$$

ここで

$$N^2 = \frac{a^2}{1 - e^2 \sin^2 \phi}$$

$$e^2 = f(2-f)$$

4. 黄道面座標系 (Fig. 11)

原点 地心

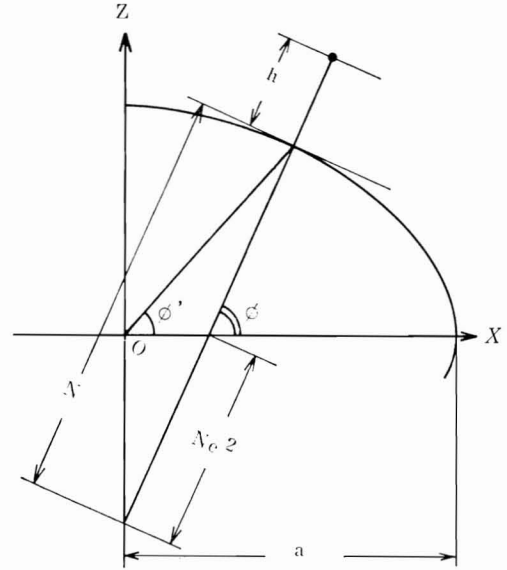


Fig. 10 Geodetic coordinate system.

Z軸 黄道面に垂直な方向

X軸 春分点方向

太陽の位置計算等に用いる座標

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

5. スピン軸座標系

原点 衛星質量中心

Z軸 スピン軸方向 \vec{a}

X軸 黄道面に垂直なベクトルとZ軸とのベクトル積の方向 $\vec{a} \times \vec{n}$

衛星の姿勢運動を計算するのに用いる座標 (Fig. 12)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(\vec{a} \times \vec{n})_x}{|\vec{a} \times \vec{n}|} & \vec{a} \times \frac{(\vec{a} \times \vec{n})_x}{|\vec{a} \times \vec{n}|} & a_x \\ \frac{(\vec{a} \times \vec{n})_y}{|\vec{a} \times \vec{n}|} & \vec{a} \times \frac{(\vec{a} \times \vec{n})_y}{|\vec{a} \times \vec{n}|} & a_y \\ \frac{(\vec{a} \times \vec{n})_z}{|\vec{a} \times \vec{n}|} & \vec{a} \times \frac{(\vec{a} \times \vec{n})_z}{|\vec{a} \times \vec{n}|} & a_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$$

6. 衛星角運動量座標系 (Fig. 13)

原点 衛星質量中心

Z軸 衛星角運動量ベクトル方向

X軸 Z軸と地心を含む面内でZ軸に垂直な方向

VISSR 観測式などを計算するのに用いる座標

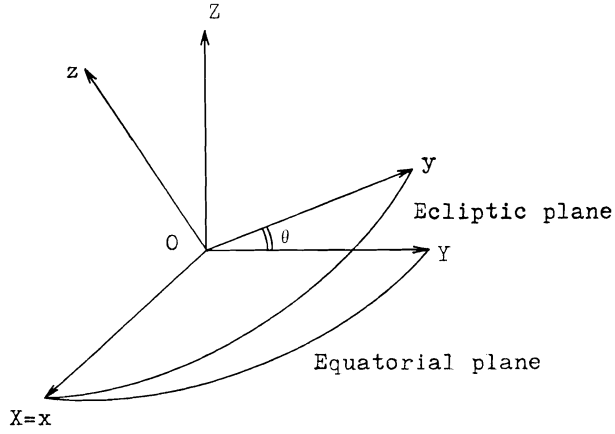


Fig. 11 Coordinate system for the computation of Sun position.

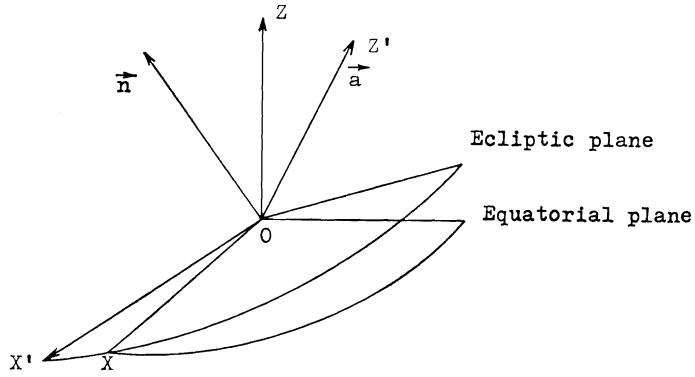


Fig. 12 Heliocentric coordinate system.

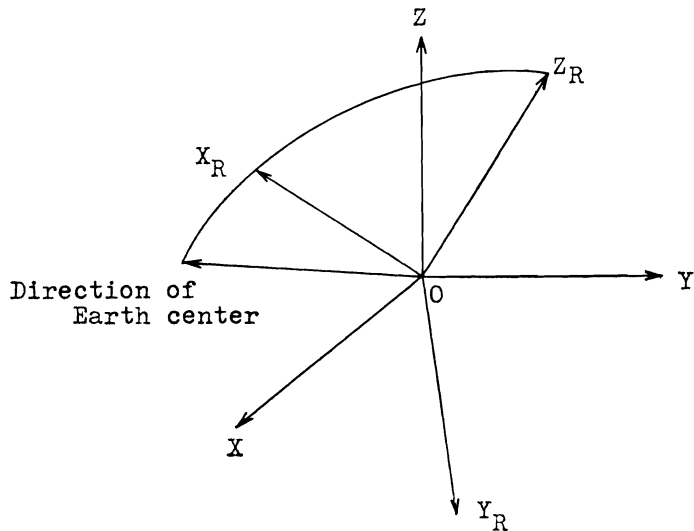


Fig. 13 Vehicle centered coordinate system.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (\vec{S}_X \quad \vec{S}_Y \quad \vec{S}_P) \begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{pmatrix}$$

$$\vec{S}_X = (\sin \beta \quad \cos \beta) \begin{pmatrix} \frac{\vec{S}_P \times \vec{S}_S}{|\vec{S}_P \times \vec{S}_S|} \\ \vec{S}_0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{S}_0 = \vec{S}_P \times \left(\frac{\vec{S}_S \times \vec{S}_P}{|\vec{S}_S \times \vec{S}_P|} \right)$$

\vec{S}_S 衛星から太陽方向の単一ベクトル

\vec{S}_P 衛星の角運動量ベクトル

$$\vec{S}_Y = \vec{S}_P \times \vec{S}_X$$

β 太陽-地球角

8. 画像前処理

8. VISSR Data Initialization System

Abstract

GMS VISSR data are input to disk packs and magnetic tapes by on-line computer system software. They are used for imaging and mapping for later transmission to MDUS and SDUS via satellite. In addition, application processing such as derivation of sea surface temperature, cloud top height, cloud amount, and cloud wind are made by using the data. Prior to these processing, VISSR Data Initialization System is needed, in order to make the quality control of the data, such as

1. VISSR data calibration

- 1) Evaluation of calibration data
- 2) IR data calibration
- 3) Visible data calibration

2. Inter-channel brightness adjustment of visible data.

This article deals with not only the processing mentioned, but other data preparation such as,

3. Compilation of satellite, parameters for data acquisition
4. Editing of parameters for image processing.

Lastly, diagnostic of VISSR data is described for the data evaluation.

はじめに

CDAS を経由して送られてくる GMS の VISSR 画像データは、DPC のオンライン系計算機処理でディスクパックや磁気テープに集信され、これをもとに FAX 画像データの作成や、海面水温、雲頂高度、雲量分布の算出および風計算をおこなう。

画像前処理はこれらの各種の画像処理に先だって行なわれる処理であり

- 各画像処理に均質な VISSR 画像データを供給するための VISSR 画像データの品質の管理
 - 画像処理の立場からの VISSR 運用のサポート
 - 各画像処理全体の能率をよくするために、各画像処理に必要な画像パラメータの作成
- を目的としている。

画像前処理が行なう処理には、以下のものがある。

1. VISSR キャリブレーション

- 1) キャリブレーションデータの取得
集信した VISSR 画像データより VISSR キャリブレーションに必要なデータの取得を行なう。
- 2) 赤外チャンネルキャリブレーション
赤外チャンネル輝度 (0~255 レベル) と温度との対応をもとめる。
- 3) 可視チャンネルキャリブレーション
可視チャンネルごとに、可視チャンネル輝度 (0~63 レベル) とアルベドとの対応をもとめる。
2. 可視チャンネルノーマライズテーブル作成
可視データのチャンネル間の輝度差をなくするノーマライズテーブルの作成を行なう。
3. S/DB 運用情報の作成
スケジュールにもとづく VISSR データ観測に対応して、S/DB に与える S/DB 運用情報の作

由田建勝・中島 忍・中村健次 **Tatekatsu YOSHIDA・Shinobu NAKAJIMA・Kenji NAKAMURA**

成を行なう。

4. 画像パラメータの編集

各画像処理に利用される画像パラメータの編集を行なう。

5. VISSR 画像データの診断

VISSR データ履歴ファイルをもとに、VISSR 画像データのチェックを行なう。

1. VISSR キャリブレーション

VISSR 画像データによって対象物の温度やアルベドを求めるためには、量子化された輝度データと温度またはアルベドとの関係をあらかじめ調べておき、輝度データの品質を保障する必要がある。

衛星から送られてくる VISSR 赤外チャンネル輝度データは、0~255 レベルに、可視チャンネルは 0~63 レベルに量子化されたものである。この赤外輝度レベルと温度、および可視輝度レベルとアルベドの関係は、GMS を打上げる前に行なわれた VISSR 地上テストによって、一応決定されている。

しかし宇宙空間への衛星打上げ後、VISSR 内部の温度変化や画像用検知器の劣化などにより VISSR 画像の輝度特性が変化すると、VISSR の輝度データの品質を一定に保つことができなくなる。そこで、VISSR の輝度データの品質を一定に保つために行なうのが VISSR キャリブレーション処理である。

VISSR キャリブレーションは VISSR キャリブレーションに必要なデータの取得と、赤外チャンネルキャリブレーション、可視チャンネルキャリブレーションの二つの処理からなりたっている。

1.1. キャリブレーション用データの取得

VISSR キャリブレーションに必要なデータとしては画像データから得られるキャリブレーション用輝度データと、テレメトリーとして送られてくる VISSR 関係の温度情報との2種類がある。このうち VISSR 関係の温度情報には、黒体シャッター温度と VISSR 内部の反射鏡温度(スキャナー温度)とがあり、これらのデータは、衛星運用管制系データ処理(Data Processing in Satellite Operation Control System)のハウスキーピング処理により GMS からのテレメトリーデータを物理量に変換し HKE ファイル(HKE File)に取得される。

ここでは、VISSR 画像データからキャリブレーション用輝度データを取得するキャリブレーション情報編集(Calibration Information Editing)処理について述べる。

キャリブレーション情報編集処理は、データ集配信処

理(Data Receipt and Distribution System)によって作成された、VISSR 画像データファイル(VISSR Image Data File)からキャリブレーション用輝度データを取得し、キャリブレーション情報ファイル(Calibration Information File)に出力することであり、キャリブレーション情報編集プログラムによって行なわれる。(Fig. 1 参照)

キャリブレーション用輝度データとして、

- ステアケース輝度(赤外チャンネルおよび可視チャンネル用)
- 宇宙空間輝度(赤外チャンネルおよび可視チャンネル用)
- 黒体シャッター輝度(赤外チャンネル用)
- 太陽輝度(可視チャンネル用)

があり、VISSR 画面内でのこれらのキャリブレーション用輝度データの挿入位置の概念図を Fig. 2 に示した。

ステアケース輝度は、各チャンネルに関する VISSR 電子回路の特性を調べるために VISSR 電子回路内部で発生する 0, 1, 2, 3, 4, 5 V の 6 ステップの電圧波形によって形成される階段状の輝度データであり、通常、VISSR スキャンラインの第 4 スキャンラインの可視および赤外データから取得する。

黒体シャッター輝度は、VISSR に取りつけてある黒体シャッターを一時的に VISSR の視野内に挿入することにより得られ、通常、第 3 スキャンラインの赤外データより取得する。

宇宙空間輝度は、赤外チャンネルにおいては絶対温度 0°K に近い温度に対応し、可視チャンネルではアルベド 0% に対応するのでキャリブレーション用データとして利用している。この宇宙空間輝度は VISSR 画面内の宇宙空間領域のスキャンラインデータから取得する。

可視チャンネルキャリブレーション用の太陽輝度データは、VISSR スキャンミラーにとりつけてある小口径の横目プリズムにより VISSR 画面内に取り入れられた太陽像から得られる。この太陽像の輝度はアルベド 50% になるよう設計されている。

Fig. 3 に示すように、VISSR の走査範囲は VISSR 画面の中心線から南北それぞれ 10° の範囲に制限されている。一年を通じて太陽データを取得出来るようにするため、3つの面をもつ横目プリズムによって南北それぞれ 26° の範囲内にある太陽像を VISSR 画面内に取り入れることが出来る。また、プリズムの小口径の東西方向の視野は VISSR の視野方向より 15° 東側に先行されているため太陽像のデータを取得出来るのは、Fig. 3 のごとく 16 Z の定時 VISSR 観測のみである。

太陽データの VISSR 画面内の位置は、衛星の軌道、

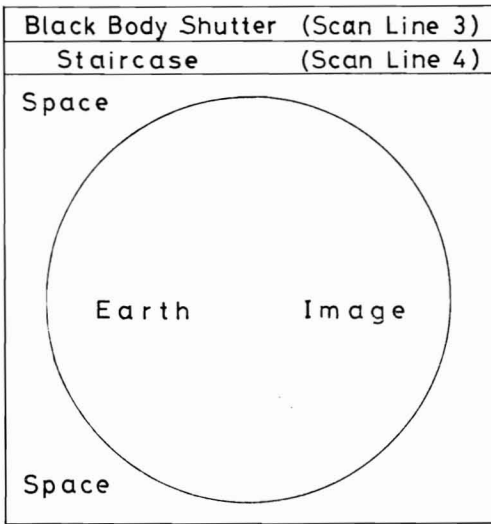


Fig. 2 Scan line format of VISSR calibration data associated with VISSR frame.

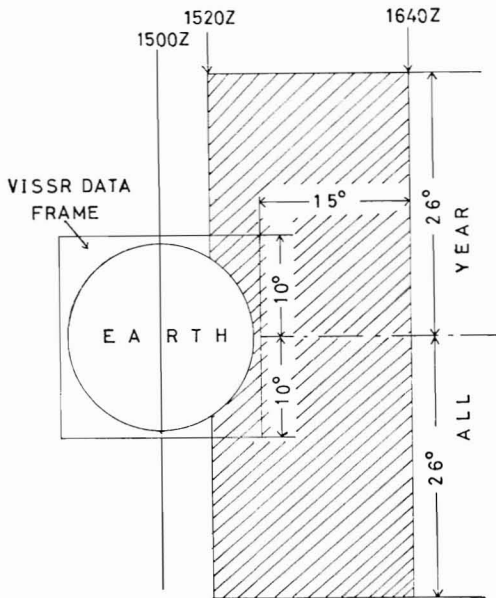


Fig. 3 Acquisition period of visible channel calibration data against position of sun.

姿勢や季節による太陽の赤経赤緯位置の変化により毎回異なる。VISSR 画面のどの部分に太陽データがあるかをあらかじめ計算しておき、太陽データの取得を行なう。

キャリブレーション情報編集プログラムで使用するキャリブレーション用輝度データはヒストグラム法によって取得する。Fig. 4 にキャリブレーションデータの例と

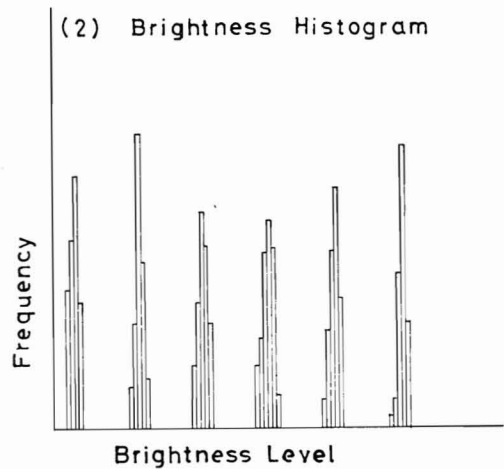
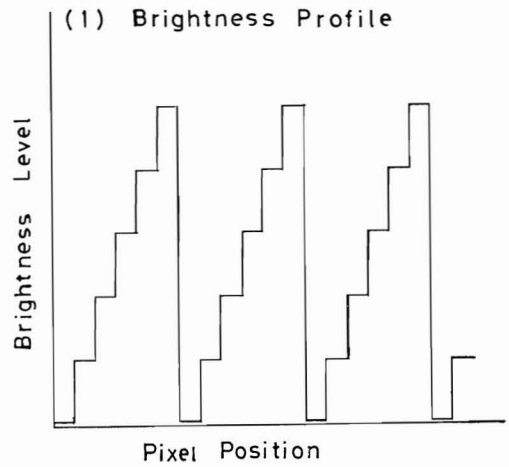


Fig. 4 Illustration of staircase brightness level data. Upper indicates brightness profile of staircase data and Lower indicates a derived histograms.

してステアケース輝度データとそのヒストグラムの概念図を示す。ステアケース、黒体シャッター、宇宙空間、太陽などの輝度値を求めるには、Fig. 5 に示すように、それぞれのデータ領域の輝度ヒストグラムを作成し、ある閾値をこえたヒストグラムピーク領域の平均輝度を求めてキャリブレーション用輝度値とする。この時、求めようとするキャリブレーション輝度データ以外の輝度ヒストグラムピーク域を除くため、キャリブレーションデータに対する輝度の上限値、下限値をあらかじめ定めておき、キャリブレーション用データに相当するピーク域についてのみ平均値を求める。

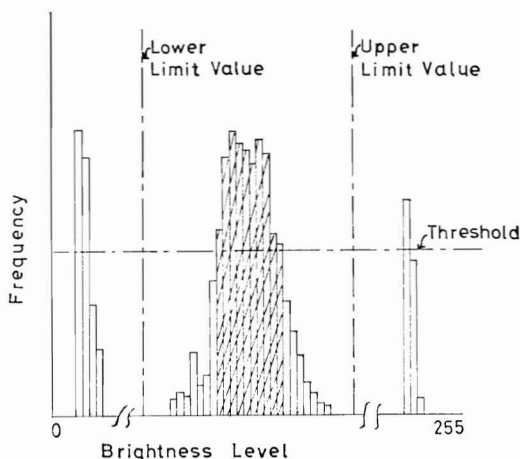


Fig. 5 Histogram method for evaluating calibration data. Value of hatched brightness level data in the histogram is taken as representative.

現在の運用では、太陽輝度データをのぞくステアケース輝度、黒体シャッター輝度、宇宙空間輝度のデータの取得は、毎日8回行なわれる定時 VISSR 観測ごとに行なわれる。

1.2. 赤外チャネルキャリブレーション

衛星から送られてくる VISSR 画像データのうち赤外画像データの輝度レベル (0~255 レベル) と温度との対応づけをするのが赤外チャネルキャリブレーション処理である。この処理は、VISSR キャリブレーションプログラムによって行なわれる。

赤外チャネルキャリブレーション処理に使用されるデータは、キャリブレーション情報編集処理で得られた、赤外チャネルのステアケース輝度、黒体シャッター輝度、宇宙空間輝度データおよび衛星運用管制系データ処理で得られた黒体シャッター温度、スキャナー温度である。これらはキャリブレーション情報編集ファイルおよび HKE ファイル (第3章 GMS のモニター参照) より入力される。

Fig. 6 に示すように、輝度と温度との関係は、輝度—電圧の関係、電圧—放射エネルギーの関係、放射エネルギーと温度との関係の三つの関係式から求めることができる。放射エネルギーと温度との関係は、プランクの式により決定される。

ここで輝度と電圧との関係式の決定について述べる。この関係を求めるのにステアケース輝度データを使用する。赤外チャネルの場合、正常であれば地上に送られてくる輝度は、VISSR 電子回路の応答電圧と、一次関係

になるように設計されている。そこで6ステップのステアケース電圧値とそれに対応する輝度値とをもとに最小自乗法により次式の係数 β_0 , β_1 を求め、輝度 C と電圧 V の関係を推定する。

$$C = \beta_0 + \beta_1 V \quad (1)$$

次に、黒体シャッター輝度、宇宙空間輝度および黒体シャッター温度、スキャナー温度を使用して電圧と放射エネルギーとの関係式を求める。まず黒体シャッター輝度 C_{sh} 、宇宙空間輝度 C_{sp} を (1) 式により、それぞれの電圧値 V_{sh} , V_{sp} に変換する。

黒体シャッター温度、スキャナー温度を用いて次式により有効シャッター温度 T_E を求める。

$$T_E = T_s + K_1(T_s - T_A) + K_2(T_s - T_2) \quad (2)$$

ここで T_s は黒体シャッターに取付けてある2個の温度センサーから得られる温度の平均値、 T_A は VISSR の第一反射鏡、第二反射鏡およびスキャンミラーにそれぞれ取りつけてある温度センサー3個の平均温度 (スキャナー温度)、 T_2 は第二反射鏡の温度である。また K_1 は第一反射鏡、第二反射鏡およびスキャンミラーの射出率と第二反射鏡の掩ぺい率より求まる係数であり $K_1 = 0.325$ を使用する。 K_2 は第二反射鏡の周囲からもれてくるエネルギーの影響を除くための項の係数であり、 $K_2 = 0.175$ としている。

(2)式で求まる有効黒体シャッター温度 T_E に対する放射エネルギー $R(T_E)$ は

$$R(T_E) = \frac{\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) B(\lambda, T_E) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

で得られる。

ここで λ は、赤外光の波長で、 $\lambda_1 = 10.5 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 12.5 \mu\text{m}$ である。 $B(\lambda, T_E)$ は有効黒体シャッター温度 T_E と波長 λ に対する Planck の関数から求まる放射エネルギーである。 $\phi(\lambda)$ は赤外検知器のスペクトル応答関数である。 ε は黒体シャッターの射出率で $\varepsilon = 0.995$ を使用している。

宇宙空間の放射エネルギーは小さいので0とみなし、先に(1)式から求めた黒体シャッター、宇宙空間に対する電圧値 V_{sh} , V_{sp} と(2)式からも求めた黒体シャッターの放射エネルギー $R(T_E)$ とをもちい、電圧 V と放射エネルギー R との関係は次式から決定される。

$$V = \frac{V_{sh} - V_{sp} R + V_{sp}}{R(T_E)} \quad (4)$$

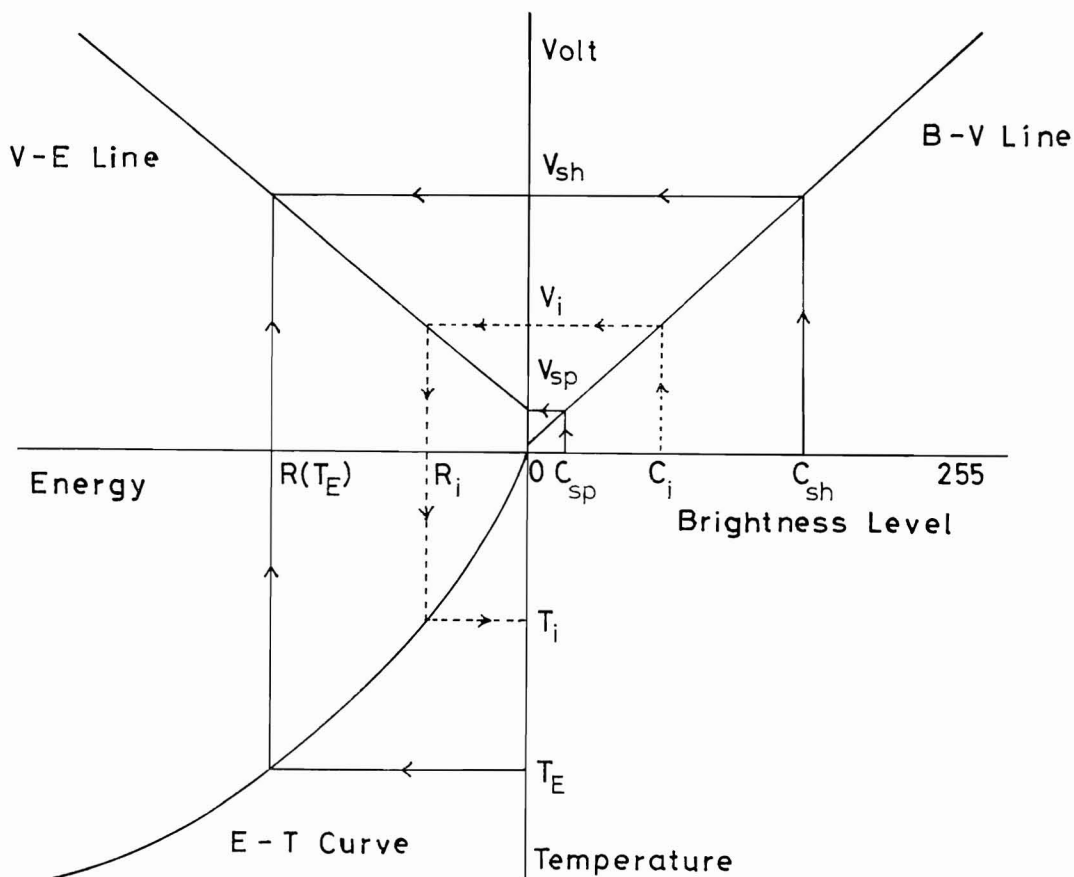


Fig. 6 Illustration of infrared calibration procedure. Brightness level-Volt conversion line (B-V line) is derived from staircase data. Brightness level of space C_{sp} and shutter C_{sh} are converted to V_{sp} , V_{sh} using B-V line respectively. Effective shutter temperature T_E is converted to energy $R(T_E)$ using Energy-Temperature curve (E-T curve) derived from Planck function, while energy of space regards as 0. Volt-energy conversion line (V-E line) is determined from $(V_{sh}, R(T_E))$ and $(V_{sp}, 0)$. From B-V line, V-E line and E-T curve each brightness level, C_i (0-255 level) can be converted to temperature T_i .

$$=G \cdot R + V_0 \quad (4)'$$

$$\left(G \equiv \frac{V_{sh} - V_{sp}}{R(T_E)}, V_0 \equiv V_{sp} \right)$$

輝度 C と電圧 V の関係式(1)と電圧 V と放射エネルギー R との関係式(4)'がもとまると、輝度 C と放射エネルギー R との関係式(5)が得られる。

$$R = \left(\frac{C - \beta_0}{\beta_1} - V_0 \right) / G \quad (5)$$

さらに放射エネルギー R と黒体放射温度 T との間には、

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) B(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

の関係がある。

(5)式で求めた各輝度 C_i (0~255 レベル) に対する放射エネルギー R_i を(6)式に代入して、温度 T_i を求めると、輝度と温度との対応づけが出来ることになる。(6)式を温度 T に関して解くことは困難である。そこであらかじめ(6)式にもとづいて $170^\circ\text{K} \sim 330^\circ\text{K}$ まで 0.25°K きざみの温度に対する放射エネルギーを求めた温度

一放射エネルギー変換テーブルを作成しておき、このテーブルを線形補間することにより放射エネルギー R を温度 T に変換する。このようにして各輝度レベル C_i に対する放射エネルギー R_i を求め、それから温度 T_i が得られる。

現在の赤外チャネルキャリブレーション処理では、輝度—電圧関係式 (1) および電圧—放射エネルギーの関係式 (4)' については、以下に述べる検定処理を行なう。

輝度—電圧の関係式 (1) に対する検定の方法は、新しく取得したステアケース輝度データをもとに、(1) 式から係数 β_0, β_1 を求め、この β_0, β_1 と、画像定数ファイル (Image Constant File) から入力した前回のキャリブレーション時に使用した β_0', β_1' とで F—検定を行ない、検定結果が 95% 以上のときには、 β_0, β_1 を採用し新しい輝度—電圧関係式を決める。そうでないときは前回使用した β_0', β_1' をそのまま採用する。

電圧—放射エネルギーの関係式 (4)' に対する検定の方法は、画像毎に求められた (4)' 式の G, V_0 をもちい、これらの平均値 \bar{G}, \bar{V}_0 (通常、8 画像分) と、画像定数ファイルから入力した前回使用した \bar{G}', \bar{V}_0' とで t —検定を行ない、検定結果が 95% 以上になったとき \bar{G}, \bar{V}_0 を採用して、新しい電圧—放射エネルギーの関係式を決める。そうでないときは、前回のキャリブレーション時に使用した関係式をそのまま採用する。

新しい輝度—電圧の関係式と、電圧—放射エネルギーの関係式から、前出の方法で輝度—温度、放射エネルギーの変換テーブルを作成しなおし、画像定数ファイルの赤外チャネルキャリブレーションテーブルの更新を行なう。新しい関係式が採用されないときはテーブルは更新しない。画像定数ファイルの赤外チャネルキャリブレーションテーブルは、後節で述べる画像パラメータ編集 (Image Parameter Editing) 処理の入力となる。

1.3. 可視チャネルキャリブレーション

集信した VISSR 画像データのうち可視画像データの輝度レベル (0~63 レベル) とアルベドとの対応づけをするために行なわれるのが、可視チャネルキャリブレーション処理である。この処理も VISSR キャリブレーションプログラムで行なわれる。

可視チャネルキャリブレーション処理に必要なデータは、キャリブレーションデータの取得で述べたように、可視チャネルのステアケース輝度データ、太陽輝度データ、宇宙空間輝度データであり、これらはキャリブレーション情報編集ファイルから入力する。

Fig. 7 に示すように、可視チャネルの輝度とアルベドとの対応は、輝度と電圧および電圧とアルベドの二つの

関係から求めることができる、まず輝度 C と電圧 V との関係ステアケース輝度データをもちいて決定する。可視チャネルの輝度は、正常な場合、応答電圧の平方根と直線関係になるよう設計されている。すなわち

$$C = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{V} \quad (7)$$

で与えられる。

6 ステップのステアケース輝度データをもちいて最小自乗法により係数 β_0, β_1 を求め、輝度—電圧の関係式 (7) を決定する。

次に宇宙空間輝度と太陽輝度とをもちいて電圧とアルベドの関係を決める。まず (7) から宇宙空間輝度 C_{sp} 、太陽輝度 C_{sun} に対する電圧値 V_{sp}, V_{sun} をもとめる。VISSR の設計上、太陽輝度に対しては 50% のアルベドとなるようになっており、また宇宙空間は 0% のアルベドとみなし、この二点により電圧 V とアルベド A との関係を示す次式が決定される。

$$V = \frac{V_{sun} - V_{sp} A}{0.5} + V_{sp} \quad (8)$$

(7) 式、(8) 式が決定されると、各輝度 C_i (0~63 レベル) に対するアルベド A_i が求まる。

可視チャネルキャリブレーション処理においても、赤外チャネルキャリブレーションで述べたように、輝度—電圧の関係や、電圧—アルベドの関係の決定に対して検定処理を行なう。

輝度—電圧の関係式 (7) に対する検定方法は、前出のチャネルキャリブレーション処理における輝度—電圧の関係式の決定に対しての検定方法と全く同じである。

電圧—アルベドの関係式 (8) に対する検定方法は、宇宙空間輝度データ、太陽輝度データのそれぞれについて新しく得たデータと画像定数ファイルから入力した前回のキャリブレーションに使用した輝度データとで t —検定を行ない検定結果が 95% 以上になったとき新しい輝度データを採用し、そうでないときは前回の輝度データをそのまま採用する。これらの輝度データを使用して電圧—アルベドの関係式を決定する。

いずれかの検定処理で新しい値が採用された場合、新しい関係式にもとづいて輝度—アルベドの変換テーブルを作成しなおし、画像定数ファイルの可視チャネルキャリブレーションテーブルの更新を行なう。そうでないときは、テーブルの更新は行なわない。

この画像定数ファイルの可視チャネルキャリブレーションテーブルは画像パラメータ編集 (Image Parameter Editing) 処理の入力となる。

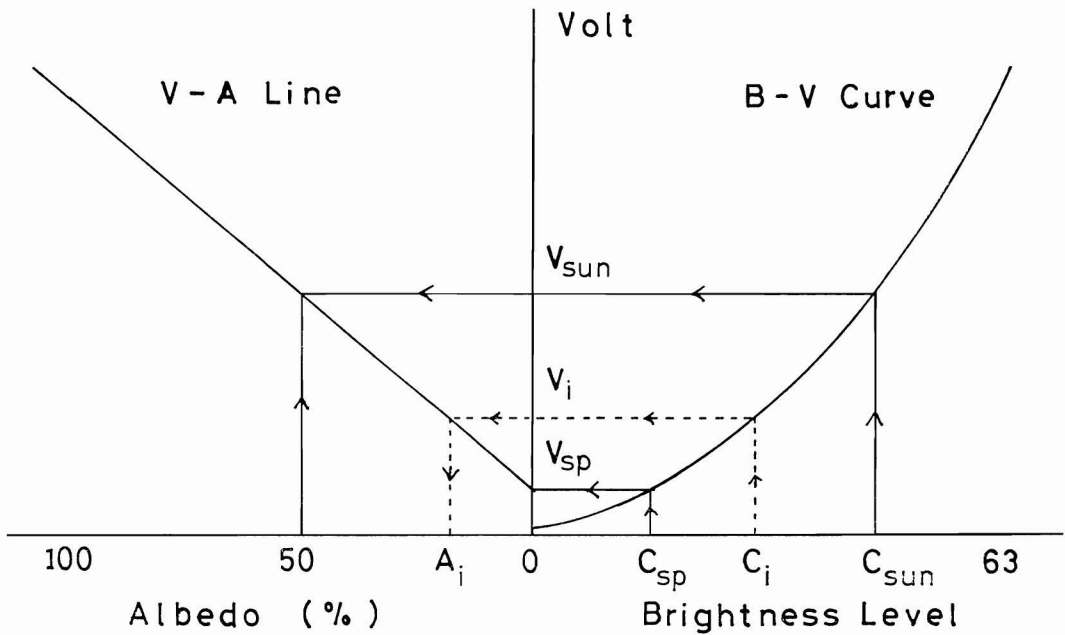


Fig. 7 Illustration of visible channel calibration. Brightness level-Volt conversion curve (B-V curve) is derived from staircase data. Brightness level of space C_{sp} and sun C_{sun} are converted to V_{sp} , V_{sun} using B-V curve respectively. Albedo of space and sun are regarded to be as 0% and 50% respectively. Volt-Albedo conversion line (V-A line) is determined from $(V_{sun}, 50)$ and $(V_{sp}, 0)$. From B-V curve and V-A line each brightness level C_i (0-63 level) can be converted to Albedo A_i .

2. 可視チャンネルのノーマライズテーブル作成

可視チャンネルの4センサーの一定入力に対するレスポンスに差があることから、4センサーからのデータをノーマライズするテーブルを作成する必要がある。このテーブルを作成する処理を可視チャンネルノーマリゼーション (Visible Channel Normalization) 処理という。処理の構成は Fig. 1 に示したようにバッチ系作業として、準備済画像データファイル (Image data file) の VISSR 可視画像を入力とし、「画像処理コンソール (IPC)」でオペレータが関与して、「ノーマライズテーブル (輝度変換テーブル)」を磁気テープに出力する。この磁気テープは、オンライン系へ渡され、画像定数ファイル (Image Constant File) を更新する。バッチ系の画像処理業務 (例えば、風計算、雲頂高度など) の中で、可視画像を使用する際に、「ノーマライズテーブル」を介して輝度変換することにより、実質的にノーマライズ (4チャンネル間の正規化) が行なわれたことになる。

2.1. 処理の概要

ノーマライズテーブルの作成の手順について述べる。

(1) 可視輝度データの取得および採用

オペレータが、IPC 画面上で、可視画像の適切な地点を指定し、データを取得する。これを以下の処理に使用するか否かは、Bolch (1974) による分散分析の手法により決定する。また各チャンネル間のデータについて線形対比を調べる。

(2) 多項式回帰曲線を決定し、ノーマライズテーブルを作成する。前述の過程で、4チャンネルの各採用レベル帯 (0~63 輝度レベル間で6~8ヵ所) で、チャンネル輝度 N_{jp} と真の輝度 \bar{N}_p を求め、多項式回帰を行なう。多項式回帰については、McCalla (1967) の文献を参照されたい。ここで

$$N_{jp} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n V_{jpm}$$

$$\bar{N}_p = \sum_{j=1}^4 a_j N_{jp}$$

ただし、 j : チャンネル番号 (= 1~4)

p : 採用レベル帯番号

n : データ取得個数

a_j : チャネル重み係数

V : 取得した可視の生データ

つづいて、多項式係数を使用して、可視輝度の「ノーマライズテーブル」を作成する。

(3) オンライン系インタフェースのための MT その入力データの作成

「ノーマライズテーブル」は、各チャネルの輝度レベルをアルベド値に対応づけたものとして作成され、画像定数予備ファイルを通じて、オンライン系の画像定数ファイル (可視チャネルキャリブレーションテーブル部) を更新する入力データとなる。

(4) 検証のための画像出力

最適な係数 (前述の n , a_j , p 等) の決定および、多項式回帰の結果を評価するために、2台の IPC 画面上に、オリジナル画像と「ノーマライズテーブル」を参照した画像とを同時に表示する。また、IPC 表示の機能である表示地点の選択、指定、表示拡大、グレースケール表示、階調変換等の機能を利用する。

(5) その他

FAX 画像を出力したときセンサー間の輝度レベルに差があるとしま模様になるため、ノーマリゼーション処理は1ヵ月に一度程度の割合で実行されている。

3. S/DB 運用情報の作成

VISSR データ集信処理では、あらかじめ定めたスケジュールに従ってオンライン系計算機により自動的に集信をおこなうので、これに応じて CDAS (Command and Data Acquisition Station, 指令資料収集局) の S/DB (Synchronizer/Data Buffer) の運用も自動運用をおこなう。この運用に必要な情報を S/DB 運用情報という。

この S/DB 運用情報を S/DB 運用情報ファイル (S/DB Operating File) に、作成するのが、S/DB 運用情報作成 (S/DB Operation Information Composition) 処理である。作成された S/DB 運用情報は、データ集配信処理によりマイクロ回線で CDAS へ伝送され、S/DB 用磁気テープに書きこまれる。

S/DB 運用情報の主な内容は下記の通りである。

1) セットアップファイル (Set up File) 用データ

- VISSR スキャンミラー駆動エンコーダおよび VISSR 画像用検知器の主系、冗長系の選択。

- 可視および赤外チャネルの Look up Table (S/DB 用輝度変換テーブル)。

- レーザビームレコーダ (LBR, Laser Beam Recorder) 画像用のグレースケールデータ。

2) ヘッダーレコード (Header Record) 用データ

- VISSR 撮像時刻。

- VISSR 撮像方式 (全球撮像, 部分撮像, シングルスキャン撮像)。

- S/DB 用太陽—地球角 (β 角) の情報。

- 地球中心のスキャンライン (ESC, Equatorial Scan Count)。

- 部分撮像時の撮像範囲指定。

- LBR 画像用の文字データ

- S/DB の位相同期条件 (PLL, Phase Lock Loop コード)。

3) グリッドレコード (Grid Record) 用データ

- LBR 画像に挿入する緯経線データ。

セットアップファイルデータは各時刻の VISSR 撮像 (1日分) に対して共通の情報を S/DB に与えるものであり、ヘッダーレコードとグリッドレコードは、各撮像ごとにそれぞれ与えなければならない情報である。

セットアップファイルデータのスキャンミラーエンコーダおよび画像用検知器の主系、冗長系の選択情報は運用スケジューラからの制御パラメータの指示により作成する。

可視および赤外チャネルの輝度変換用 Look up Table と LBR 画像用グレースケールデータについては画像定数ファイルにあらかじめ数種類定義しておき、どれを使用するかは運用スケジューラからの制御パラメータで指示される。通常の運用では GMS から入力してくる輝度レベルをそのまま S/DB から出力する形式の Look up Table を使用している。

ヘッダーレコード内の VISSR 撮像時刻、撮像方式、部分撮像の範囲、アノテーション用の文字データ、S/DB 位相同期の条件などは、S/DB スケジュールファイル (S/DB Schedule File) から入力する。

β 角情報は、S/DB で地球像を画面内にとり入れる時に、東西方向の VISSR 画像の取り出し範囲を決めるために使用されるが、この情報には、VISSR 撮像時刻 t_0 に対する太陽—地球角 (β 角) β_0 とその変化率 $\dot{\beta}$ とがある。これらは、精姿勢予測ファイル (Precise Attitude Prediction File) または粗姿勢予測ファイル (Coarse Attitude Prediction File) から入力する5分ごとの天文学的な太陽—地球角 (β 角) の予測値をもとに最小自乗法によりもとめ、S/DB で使用するための形式に変換する。

DPC (Data Processing Center, データ処理センター) から送ったこれらの β 角情報をもとに、S/DB では VISSR スキャンラインごとの β 角を計算するが、この

ラインごとの β 角は VISSR 画像データの先頭に付加されている S/DB ドキュメンテーションの 1 項目として DPC へ送られる。

地球中心のスキャンライン番号 (ESC) は、南北方向の VISSR 画像の取り出し範囲を決めるために使用される。これは、軌道予測ファイル (Orbit Prediction File) から入力した VISSR 撮像時刻における衛星直下点の予測緯経度値を座標変換してスキャンライン番号として求める。

DPC にはオンライン系計算機による FAX 画像作成ができなくなったときのバックアップ用としてレーザービームレコーダ (LBR) を設置している。この出力である LBR 画像に緯経度のグリッドを挿入することができるが、このためのデータがグリッド用データである。グリッドデータとして作成すべき緯経度の位置情報は、画像定数ファイルに S/DS グリッドデータとして格納されており、これを VISSR 撮像時刻の姿勢予測値、軌道予測値をもちいて座標変換を行ない、S/DS 運用情報のグリッドレコード用データとして作成する。

GMS の VISSR 撮像スケジュールでは 3 時間毎の定時 VISSR 観測および風計算用 VISSR 観測を含めて 1 日 14 回の全球撮像による VISSR 観測をおこない、さらに異常気象時には、毎正時に臨時 VISSR 観測として部分撮像による VISSR 観測を行なう。これらの観測のための S/DB 運用情報は、1 日 1 回まとめて S/DB 運用情報ファイルに作成され、定刻にデータ集配信処理により CDAS へ伝送される。

4. 画像パラメータ編集

衛星からの VISSR 画像データは、まず、CDAS の S/DB でラインストレッチャやスキャンライン間のジッター除去などの処理により利用しやすい画像データに変換されて DPC に送られてくる。

CDAS からの VISSR 画像データをもとに FAX 画像データを作成したり、海面温度、雲量分布、雲頂高度の算出や風計算処理などをおこなう場合には、VISSR 画像の輝度レベルに対する情報としての、赤外、可視チャンネルのキャリブレーションテーブルや画像データの座標変換に使用される姿勢、軌道データなどが必要である。また、VISSR 集信時には、データ集配信処理に VISSR データ集信に必要な制御情報をパラメータとして作成し与える必要がある。これらの各種の情報を画像パラメータとして、画像パラメータファイル (Image Parameter File) に作成するのが、画像パラメータ編集 (Image Parameter Editing) 処理である。

画像パラメータ編集は、VISSR 観測に先だって各観測単位ごとに行なわれる。作成された画像パラメータは、VISSR 集信時に、データ集配信処理によって VISSR 画像データファイル (VISSR Image Data File) や VISSR データ履歴ファイル (VISSR Original Image Data File) の先頭部分にパラメータ部として格納され、VISSR 画像データを利用する時に使用される。画像パラメータは種類ごとに分類され、それぞれブロック単位として作成される。以下にそれぞれのブロック名とその主な内容を示す。

1) モードブロック

モードブロックには VISSR 観測に関する最も基本的な情報、すなわち VISSR 撮像予定時刻、GMS 運用方式、VISSR 画像データの集信方式や、VISSR 画像データの定義を示す基本的なパラメータ、画像用検知器の障害の有無の情報などが格納されている。これらの情報は、運用スケジューラからの制御パラメータや画像定数ファイルのデータをもとに作成される。

2) S/DB 運用情報ブロック

VISSR 観測がどのような S/DB の運用によって行なわれたかを示す履歴的な意味で、VISSR 観測時に使用した S/DB 運用情報のセットアップファイルデータとヘッダレコードデータをこのブロックに格納する。これらのデータは、S/DB 運用情報ファイルから入力される。

3) 赤外チャンネルキャリブレーションブロック

このブロックには、集信した VISSR 画像データのうち、赤外画像データの処理に利用する赤外チャンネルキャリブレーションテーブルが格納されている。このテーブルには、輝度—放射エネルギー変換テーブルと輝度—温度変換テーブルとがあり、画像定数ファイルより入力する。

4) 可視チャンネルキャリブレーションブロック

このブロックには、可視チャンネルキャリブレーション処理によって作成された各チャンネルごとの輝度—アルベド変換テーブルか、または可視チャンネルノーマライズ処理によって作成された可視チャンネルノーマライズテーブル (輝度—アルベド変換テーブルの形式) を格納するが、現在は、可視チャンネルノーマライゼーションテーブルを格納している。この情報も、赤外チャンネルの場合と同様に画像定数ファイルより入力する。

5) 座標変換ブロック

座標変換ブロックは、座標変換定数ブロック、姿勢予測データブロック、軌道予測データブロックの 3 種類によって構成されている。座標変換定数ブロックは、

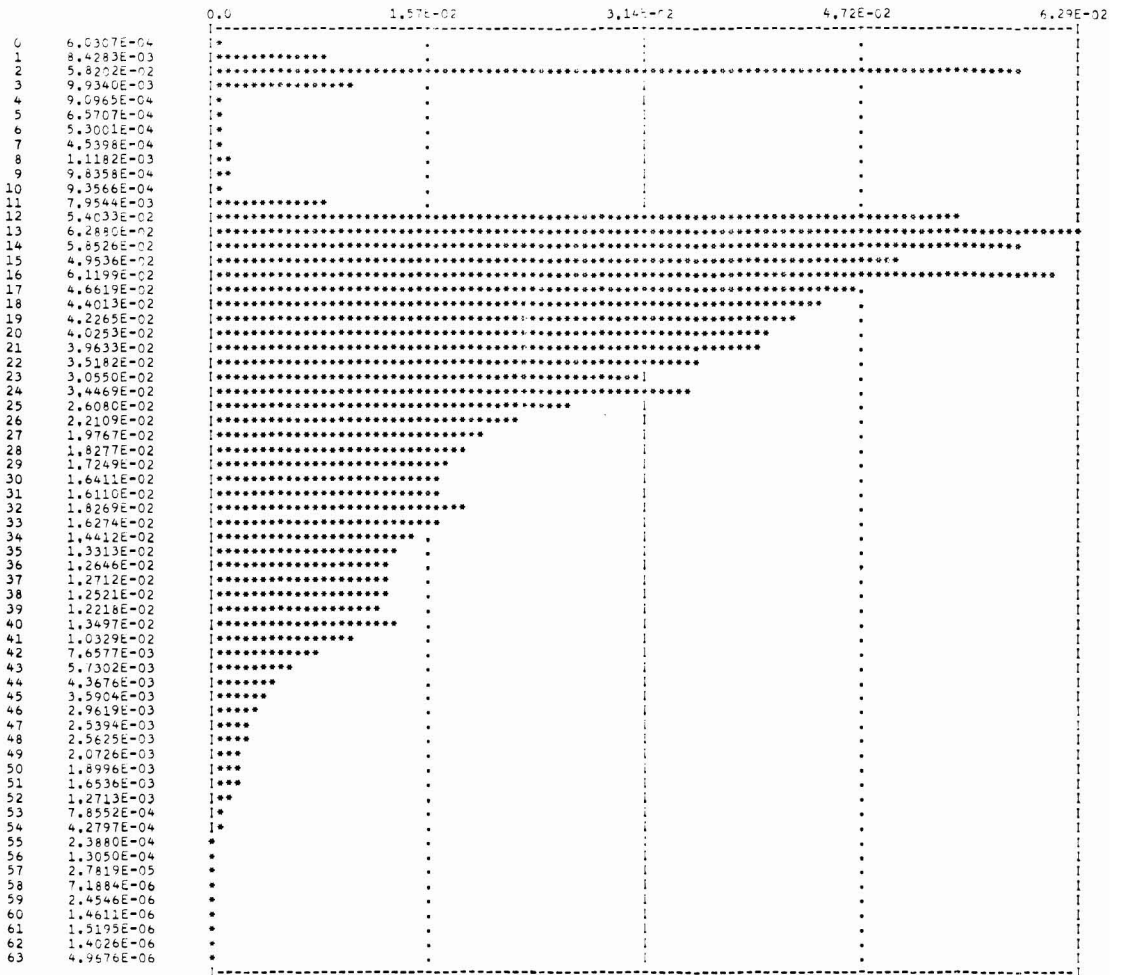


Fig. 8 Histogram of Visible brightness level data.

VISSR スキャンラインのステップ角や、ピクセルのサンプリング角など VISSR 画像の内容を定める定数データや、地球の半径、離心率など地球に関する定数データを格納する。これらの定数は画像定数から入力する。その他に軌道決定値や姿勢決定値、VISSR ミスアライメントも座標変換ブロックに格納するが、これらのデータは、軌道予測ファイルおよび精(粗)姿勢予測ファイルから入力する。

姿勢予測データブロックには、精姿勢予測ファイルまたは粗姿勢予測ファイルから入力した、VISSR 撮像時間に対応する 5 分間隔の姿勢予測データ (33個) を格納する。1 個の姿勢予測データには、衛星スピンの赤経、赤緯方向、太陽-地球角 (β 角)、衛星のスピンの速度などの予測値が含まれる。

軌道予測データブロックには、軌道予測ファイルより

入力した、VISSR 撮像時間に対応する 5 分間隔の軌道予測データ (18個) を格納する。1 個の軌道予測データには、軌道 6 要素や衛星直下点緯経度の予測値が含まれる。

6) データ集配信ブロック

このブロックには、データ集配信処理が VISSR 画像データを集信するのに必要な情報が格納される。

VISSR 撮像範囲のスキャンライン番号、地球中心のスキャンライン番号 (ESC)、衛星のスピンの速度などの情報はもとより、その他に VISSR 画像データ集信時に、データ集配信が行なう以下のような処理に必要な情報も含まれる。

- エラーラインの判定
- S/DB 運用モードのチェック
- 障害画像用検知器データの判定

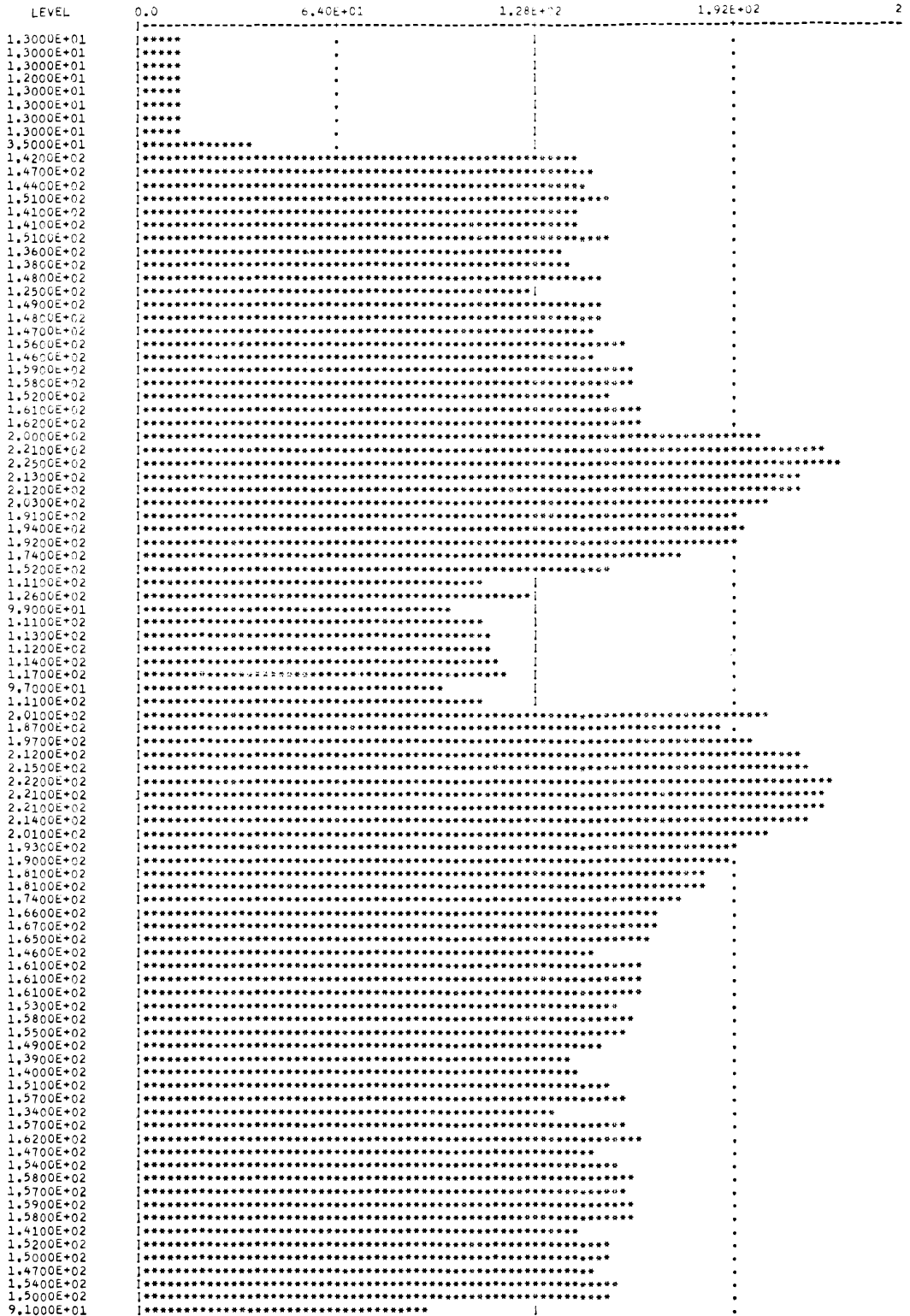


Fig. 9 Infrared brightness level scan profile.

- 以後の画像処理を容易にするためのラインコントロールワード (LCW) の VISSR データへの付加
- 地球の東西アースエッジの情報をもとに行なう東西方向の地球中心位置の決定
- スキャンラインごとに付加されている β 角の一部の保存
- FAX 画像データ作成に必要な VISSR 画像データが集信されたかどうかの判定

これらの情報は、運用スケジューラからの制御パラメータや、画像定数ファイル、FAX 定義パラメータファイル (FAX Definition Parameter File) のデータをもとに作成される。

5. VISSR 画像データの診断

VISSR 画像データを使用する上で画質の状態や変化を把握しておくことが必要である。VISSR データ履歴ファイル (VISSR Original Image Data File) 中の VISSR 画像データに対し、VISSR 診断 (VISSR Diagnostic) プログラムを使用することにより各種の解析をおこない、その結果をラインプリンタに出力する。この処理はバッチ系計算機でおこなう。(Fig. 1 参照)

VISSR 診断プログラムは主に以下の機能をもっている。

- 1) 輝度ヒストグラムの作成
- 2) 輝度グラフ (画像データラインの輝度プロフィール) の作成

- 3) 輝度データのパワースペクトル算出
- 4) 画像データの印刷
- 5) S/DB ドキュメンテーションの印刷
- 6) ラインコントロールワード (LCW, Line Control Word) の印刷
- 7) エラーライン統計情報の印刷
- 8) エラー情報ブロックの印刷
- 9) 画像パラメータの印刷
- 10) データシーケンスの印刷

地球画像領域の輝度ヒストグラムを随時調べることにより画像の輝度分布がわかり、これを経年的にチェックしておくこと VISSR 検知器の劣化などを知ることができる。

ステアケースや黒体シャッター、太陽データなどキャリブレーション情報部の輝度ヒストグラムや輝度グラフを作成することによりキャリブレーション用輝度データの状態を調べることができる。可視チャンネル4個の輝度特性のばらつきも、各チャンネルごとの輝度グラフを比較することにより可能である。

画像データに系統的なノイズが含まれているかどうかは、パワースペクトルを算出することによって検出できる。また、画像の分解能が良いほど高周波域におけるパワースペクトル密度が高くなるので VISSR の焦点調整にも利用できる。

画像データの印刷では、濃淡画像または英数字のパターンで画像データをラインプリンタに出力する。地球像

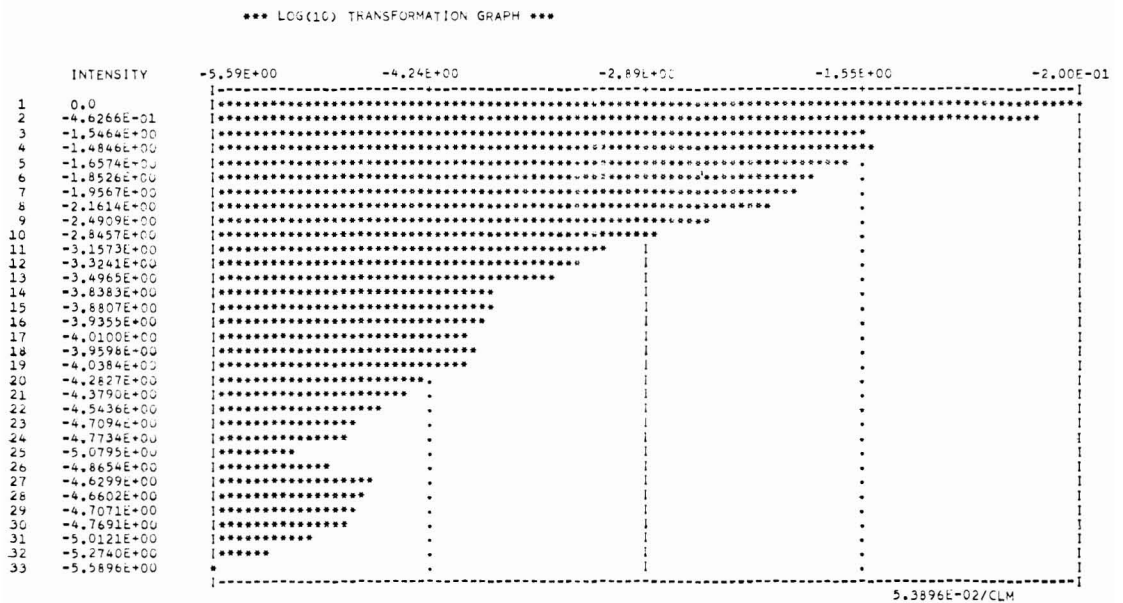


Fig. 10 Power spectrum of visible image data.

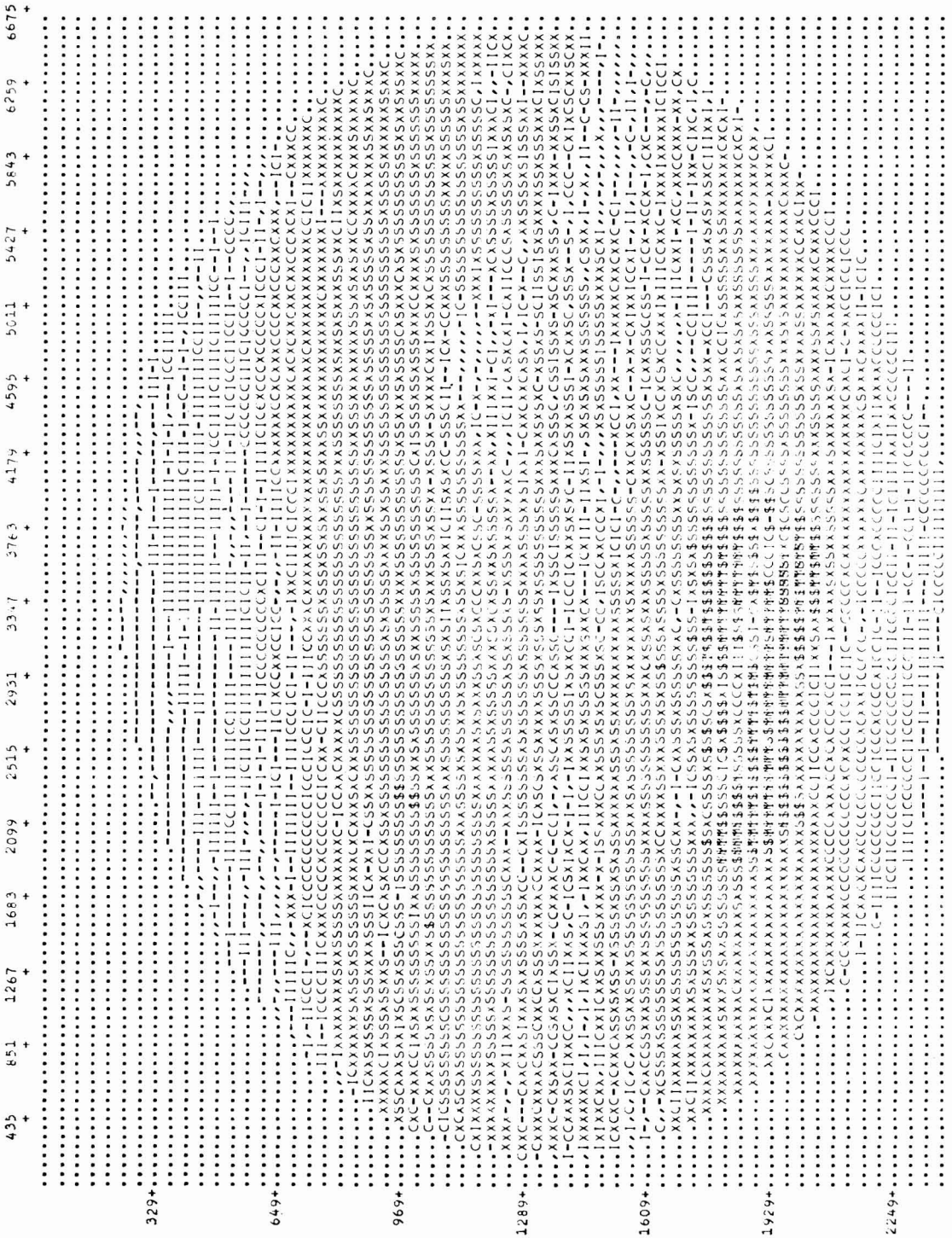


Fig. 11 Print out of earth image data (IR).

の東西端などの領域を出力することによって画像のラインジッタなどを調べることができる。

スキャンライン番号, β 角, 地球像の東西端などに関係した付加情報を知りたい場合は, S/DB ドキュメンテーションの印刷やラインコントロールワードの印刷をおこなえばよい。

VISSR データ集信時にデータ集配信処理が VISSR 画像データのエラーライン検出をおこなうが, エラーライン統計情報を出力することによりエラーラインの内容やエラーライン数, 百分率が出力される。

VISSR データ履歴ファイルの最終ブロック (エラー情報ブロック) には, データ集配信処理でおこなう赤外および可視の地球画像の東西方向中心位置や, 精姿勢処理で使用する保存 β 角の情報が格納されている。この最終ブロックを出力したい場合にはエラー情報ブロックの印刷処理をおこなえばよい。

VISSR データ履歴ファイルに VISSR 画像データとともに格納してある画像パラメータを印刷してその内容

を知ることできる。

また, データシーケンスの印刷によりファイルのブロック番号とそれに格納されている VISSR データスキャンラインとの関係がわかる。

VISSR 診断プログラムによるラインプリンター出力結果の例として, 輝度ヒストグラム, 輝度グラフ, パワースペクトル図, および画像データ印刷の例を Fig. 8~ Fig. 11 に示した。

処理する VISSR 画像データに対してのピクセルおよびラインのサンプリング率はパラメータにより指定することができる。

参 考 文 献

- 1) Bolch, B. W. and C. J. Huang, 1974: 「応用多変量解析」中村慶一訳, 森北出版 (1976年), 133~177.
- 2) McCalla, T. R., 1967: 「数値計算法概論」三浦功他訳, サイエンス社 (1972年), 210~219.

9. FAX 画像データの作成

9. Mapping and Display of Image Data

Abstract

The facsimile image data are produced in several kinds of format useful for meteorological analysis from the VISSR image data at DPC.

There are two types of facsimile transmission, one is for high resolution images, the other for low resolution images. High resolution images have two kinds, disk images and mapped images.

Disk image data is produced by Image Conversion Program and FAX Auxiliary-pattern Generation Program. Mapped image data is produced by Image Block Transformation Program, FAX Image Data Compiling Program and FAX Auxiliary-pattern Generation Program.

Earth locator grids are automatically melded with these FAX image data as follows. Earth locator grid for disk image is prepared by transforming the standard grid data using orbit and attitude data at the time when VISSR data is acquired, and is melded with FAX image data.

VISSR image data is transformed to Mercator (or Polarstereo-graphic) projection format, and grid is superimposed on the image.

Whole image is divided into lots of rectangle blocks and processed individually, in order to same time for computer processing. Co-ordinate transformation is made for the four vertexes of each block, and the inner points are interpolated using the data for vertexes.

概 要

DPCでは、集信したVISSR画像データをもとに、気象解析者が利用しやすい形式のFAX画像を作成する。

FAX画像には、HR-FAX用とLR-FAX用の2種がある。また、HR-FAX用には、2つのタイプの画像があり、一つは円形系FAX画像であり、もう一つは、地図投影系FAX画像である。

これらのFAX画像のデータ(FAX画像データ)は、次の4つの処理プログラムにより作られる。円形系FAX画像データの作成は、補助図形作成プログラムと画像変換プログラムの二つによる。地図投影系FAX画像データの作成は、補助図形作成プログラム、ブロック処理プログラム、FAX編集プログラムの三つによる。

これらのFAX画像は、計算機で、自動的に、グリッドの挿入が行なわれる。円形系FAX画像に対しては、そのFAX画像作成の度に、グリッドを、軌道姿勢情報等により、地球画像にフィットするように変換して、挿入する。地図投影系FAX画像については、VISSR画像を変換して、地図と同形のグリッドを重ね合わせる。

FAX画像データの作成には、グリッドの挿入の他、輝度変換、補助図形付加の処理が行なわれる。

地図投影系FAX画像の作成では、処理時間の短縮のため、FAX画像をブロックに分け、その頂点についてのみ座標変換を、ブロック内については補間変換を行なう。

由田建勝, 高橋大知, 安東義彦 **Tatekatsu YOSHIDA, Taichi TAKAHASHI, Yoshihiko ANDO**



Fig. 1 HR-FAX; full-disk picture.



Fig. 2 HR-FAX; enlarged partial-disk picture.



Fig. 3 HR-FAX; partial-disk picture.

1. FAX 画像の種類

DPC では、取得した VISSR 画像データをもとに、気象解析者が利用しやすい資料の一つとして、FAX 画像を出している。

FAX 画像には、高分解能ファクシミリ用 (HR-FAX) と低分解能ファクシミリ用 (LR-FAX) がある。HR-FAX 画像は気象庁と MDUS へ、また、LR-FAX 画像は SDUS へ送られる。

FAX 画像の作成には、二種類の処理の流れがある。一つは、円形系 FAX 画像を作る補助図形作成処理から画像変換処理への流れであり、もう一つは、補助図形作成処理からブロック処理・FAX 編集処理への流れである。

また、FAX 画像の地球画像の形によって、円形画像、部分円形画像、分割円形画像、ポーラステレオ投影画像、メルカトール投影画像に分類される。これらの FAX 画像に、どのような地球画像を出力するかは、FAX 定義パラメータファイルの FAX 定義テーブルに定義されている。

現在 (1978.4.1) 定義されている各 FAX 画像の地球画像は、次のようになっている。

・HR-FAX 円形画像 (Fig. 1)

FAX の地球画像領域に、いっぱい大ききで、地球全球を表示する。このため地球画像の直径は 417 mm となる。

・HR-FAX 部分円形画像 (Fig. 2, 3)

FAX 画像の地球画像領域に、日本を含む地球画像の一部分を円形のまま、円形画像より拡大して表示する。または、円形画像と同じ縮尺で、地球画像の一部を表示する。

・LR-FAX 分割円形画像 (Fig. 4)

FAX 画像の地球画像領域に、地球全球を 7 分割して表示する。これらの地球画像はたがい、オーバーラップしている。

・ポーラステレオ投影 FAX 画像 (Fig. 5)

北緯 60° で 2000 万分の 1 のポーラステレオ地図へ地球画像を投影して表示する。

・メルカトール投影 FAX 画像 (Fig. 6)

緯度 22.5° で 2000 万分の 1 のメルカトール地図へ地球画像を投影して表示する。

これらの FAX 画像には、VISSR 画像の可視画像データを使用した可視 FAX 画像と、赤外画像データを使用した赤外 FAX 画像の二種類がある。

Table 1 に、これら FAX 画像の分類表を示す。

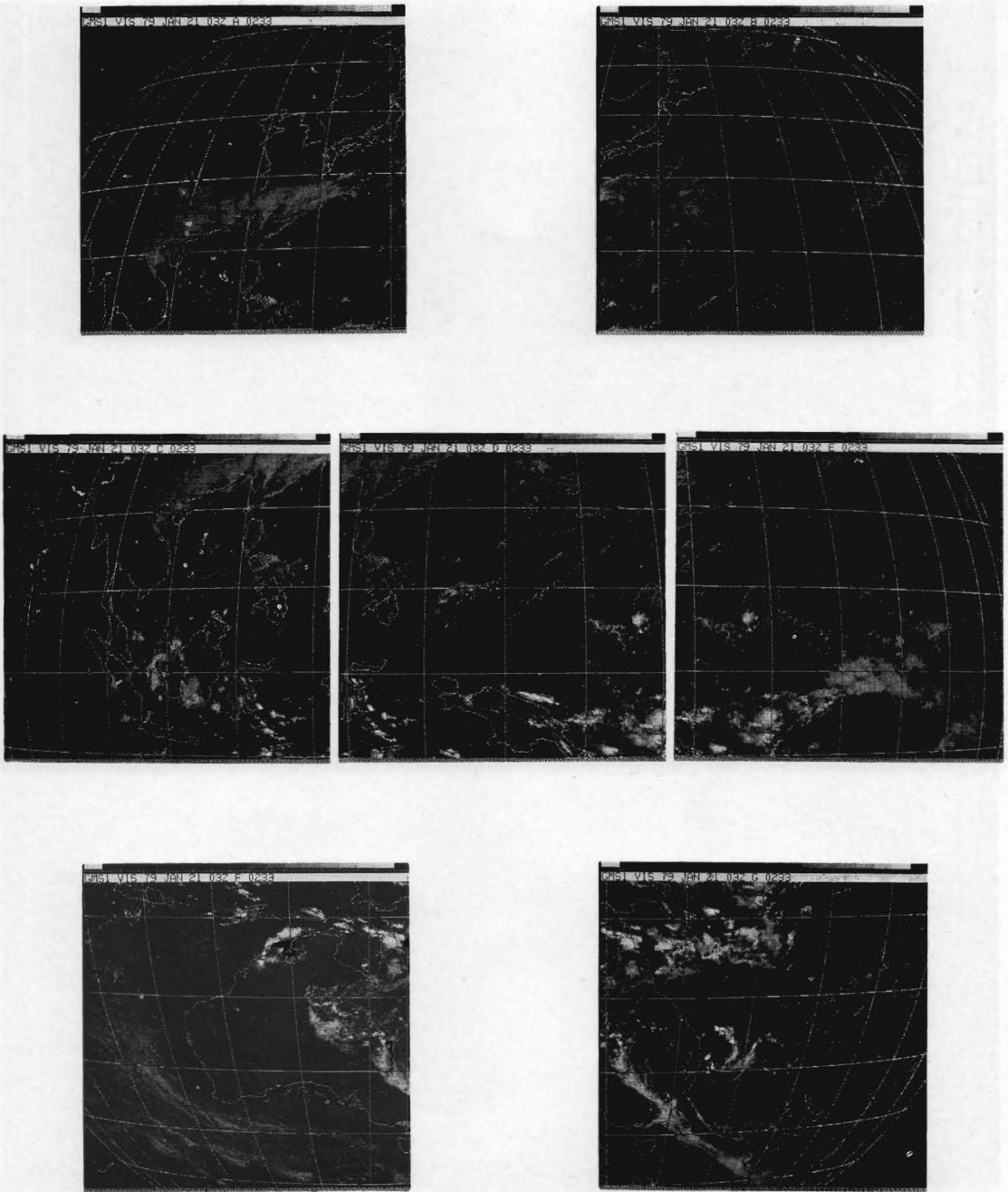


Fig. 4 LR-FAX; sectorized picture.

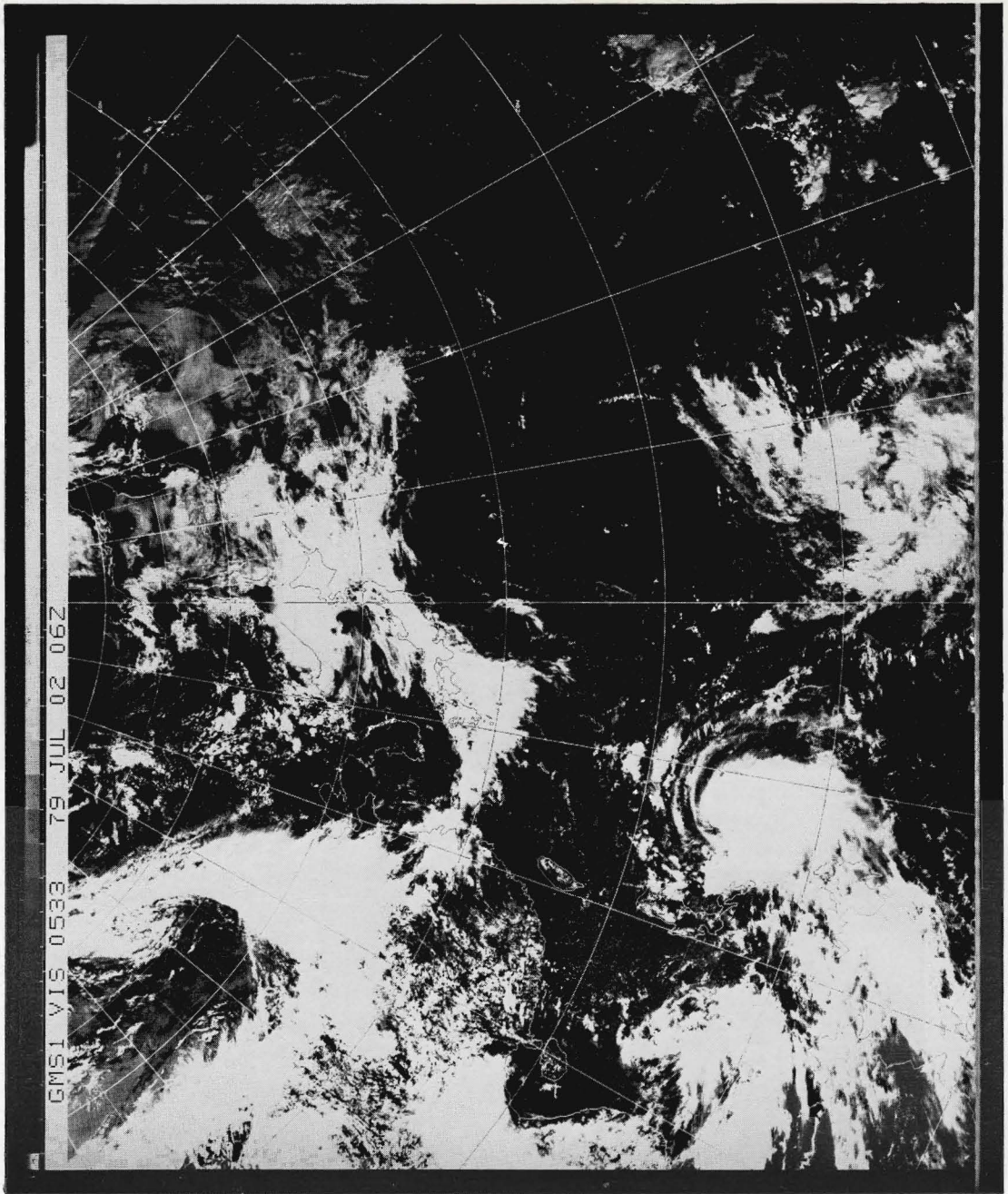


Fig. 5 HR-FAX; Polarstereo projected picture.

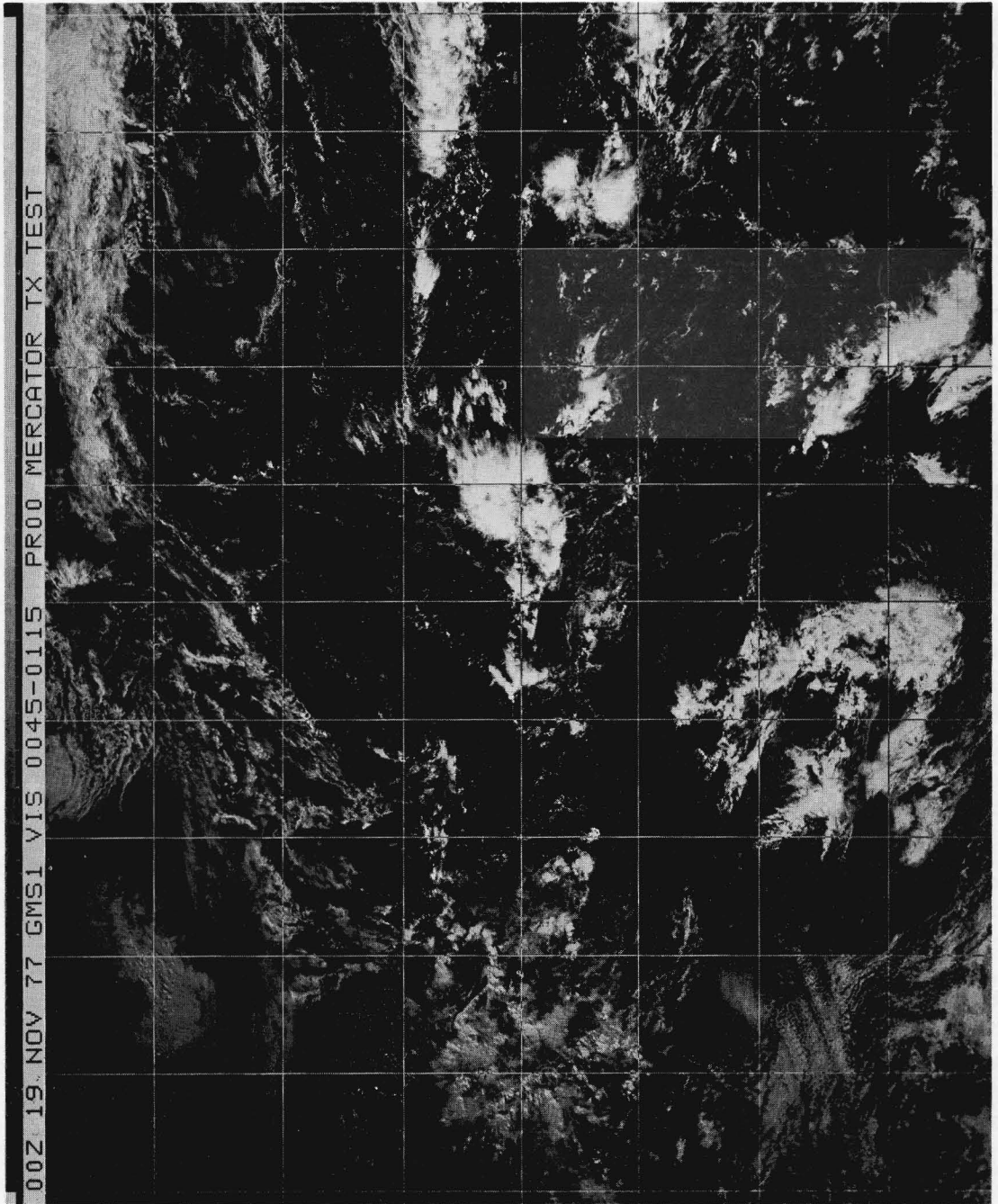
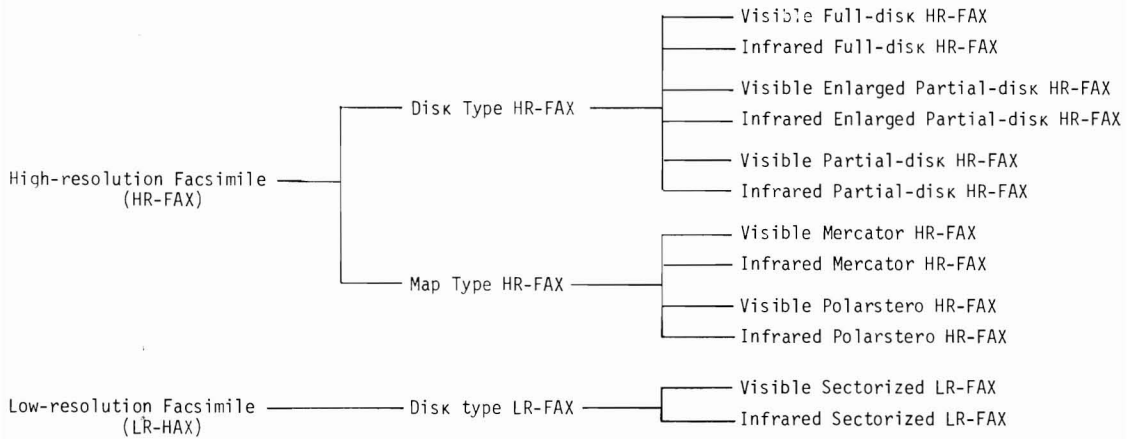


Fig. 6 HR-FAX; Mercator psojected picture.

Table 1 List of FAX pictures dissemination from DPC



2. FAX 画像のデータ・フォーマット

FAX 画像の 計算機内でのデータ・フォーマットは、FAX 受画機の仕様により定まる。現在 (1978.4.1) の FAX 受画機の 画像データの仕様は、次のとおりである。

• HR-FAX

- 4562 ライン / 画像
- 10112 ピクセル / ライン
- 64 階調 / ピクセル
- (6 ビット / ピクセル)
- 10.42 ライン / mm

• LR-FAX

- 800 ライン / 画像
- 1710 ピクセル / ライン
- 64 階調 / ピクセル
- 3.83 ライン / mm

この仕様は、可視画像・赤外画像とも同一である。

FAX 画像データは、HR-FAX 画像の場合、HR-FAX 画像前半ファイルと、HR-FAX 画像後半ファイルに分割されて納められている。また、LR-FAX 画像の場合は、各分割 FAX 画像ごとに、LR-FAX 画像ファイルに納められている。HR-FAX 画像データ、及び、LR-FAX 画像データには、位相信号・グレースケール・スケールマーク・アノテーション・地球画像の各データと、ラインコントロールワード (LCW) が含まれる。また、HR-FAX 画像データには、バックポーチデータも含まれる。これらのデータは、データ集配信処理によって、FAX 画像信号として、FAX 受画機へ送り出される。しかし、LCW は、データ集配信処理が、配信の際

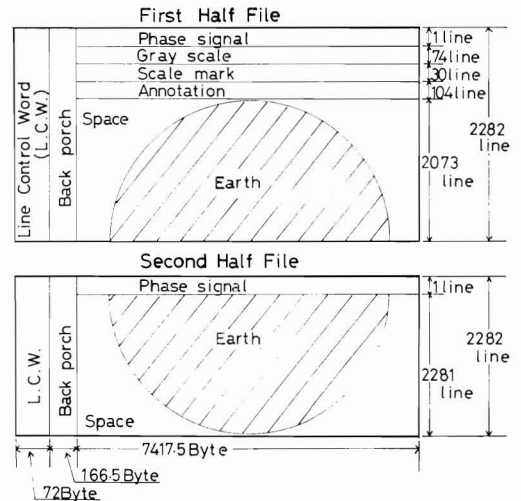


Fig. 7 HR-FAX layout on magnetic disk packs. Usually the first half HR-FAX and the second half are processed respectively. So they are stored in two magnetic disk packs.

に使用する情報が格納されており、FAX 画像信号としては送り出されない。

HR-FAX 画像データファイル、及び、LR-FAX 画像データファイルの、データ格納レイアウトを、Fig. 7、及び Fig. 8 に示す。

3. 円形系 FAX 画像の作成

円形系 FAX 画像の作成プログラムの構成を Fig. 9 に示す。

FAX 補助図形作成プログラム (FAX Auxiliary-pattern Generation) は、グレースケール・スケールマー

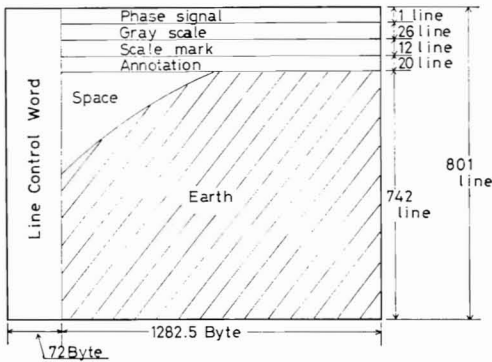


Fig. 8 LR-FAX layout on magnetic disk packs
The figure shows one of the seven sectorized picture.

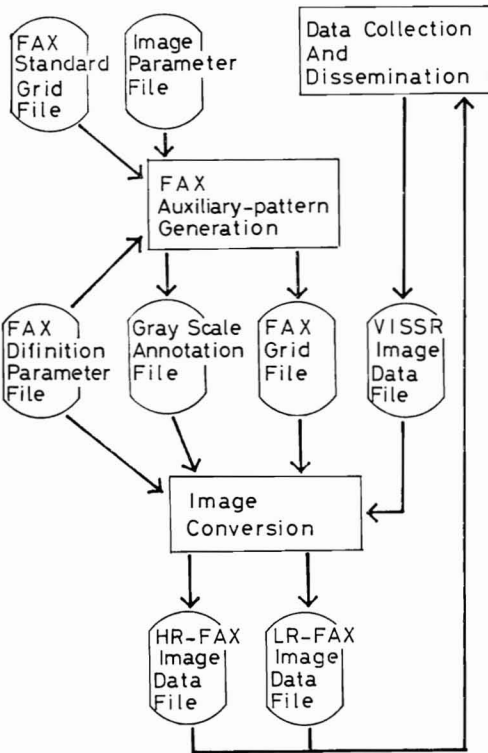


Fig. 9 Design overview of FAX producing program for disk image.

ク・アノテーションの各データを、グレースケール・アノテーションファイル (Gray Scale-Annotation File) に作成する。また、地球画像に挿入する緯経線・地図データ・ベンチマークを、FAX グリッドファイル (FAX Grid File) に作成する。

続いて、画像変換プログラム (Image Conversion) に

より VISSR 画像データファイル (VISSR Image Data File) から得られる VISSR 画像データを、拡大 (VISSR 画像の 1 画素を FAX 画像の数画素に対応づける) 又は、縮小 (VISSR 画像をサンプリングして FAX 画像を作る) 変換を行なう。同時に VISSR 画像の輝度を FAX 画像の利用に都合の良い輝度に変換する。これらの変換の後に、先に作成したグレースケール・アノテーションファイルと FAX グリッドファイルに格納されている補助図形データを付加および挿入する。

この様にして作成された FAX 画像データは、HR-FAX 画像データファイル、又は LR-FAX 画像データファイルに格納されて、データ集配信プログラムに渡され、配信される。

次に個々の処理プログラムについて、詳細に述べる。

3-1 補助図形作成プログラム

1) グレースケール、スケールマーク、アノテーションデータの作成

グレースケールとスケールマークの表示形式は、FAX 定義パラメータファイル (FAX Definition Parameter File) にある FAX 定義テーブルに、定義されている。1978 年 4 月 1 日に定義されているグレースケールで、HR-FAX 画像に付加されるものは、32 階調表示で、地球画像データ 64 階調 (0~63 レベル) のうち、0, 2, 4, ..., 62 の各輝度を表わしている。また、LR-FAX 画像に付加されているものは、16 階調表示で、同様に、地球画像データの 0, 4, 8, ..., 60 の各輝度を表わしている。

グレースケールの下に有るスケールマークには、上半分に、グレースケールの各輝度の境界を示すマークがあり、下半分には、それらの輝度がアルベド値 (可視画像の場合) 又は、温度 (赤外画像の場合) とどのように対応しているかを示すマークが表示されている。このマークは、可視の場合 0% から 5% きざみで 95% まで、左から右に並んでいる。50% に相当するマークは、他のマークより太くなっている。また、赤外の場合は、30°C から 10°C きざみで 0°C までと、0°C から 5°C きざみで -80°C まで、左から右へ並んでいる。0°C のマークが、いちばん太く、10°C ごとに、中くらいの太さで、5°C ごとのマークは、細くなっている。それぞれのマークは、上半分の輝度レベルの区切マークの位置が、おおよそどの程度の、アルベド値又は、温度に相当するか、分かるようになっている。

アノテーションデータは、運用スケジューラ (Operation Schedule Monitor) から、渡される、VISSR 撮像時刻や、可視・赤外の区別などの、FAX 画像の説

明を、FAX 定義テーブルに定義されている「FAX で使用する文字パターン」を用いて表現する。

このようにして、グレースケール・スケールマーク・アノテーションは、各 FAX 画像ごとに FAX 定義テーブルと、運用スケジューラから得られる情報とにより、補助図形作成プログラムによって作成され、グレースケール・アノテーションファイルに格納される。

2) 緯経線、地図データ、ベンチマークデータの作成
地球画像に挿入される緯経線は、10度ごと、または、5度ごとの二種類が有る。また、地図データとしては、海岸線、河川、湖沼のデータが有る。これらの他に、ループレフィルムによる風計算処理に必要な、円形 FAX 画像に挿入するベンチマークデータが有る。これらのデータは FAX 基準グリッドファイル (FAX Basic Grid File) に格納されている。また、FAX 定義テーブルには、緯経線、地図データの挿入形式 (実線か点線か、線の太さ、挿入する地図データの選択など) が定義されている。

円形系 FAX 画像では、VISSR 画像からの拡大か、縮小の処理しか行なわないので、挿入される緯経線と地図データは、その VISSR 画像撮像時の衛星の軌道と姿勢などの情報によって、画像に合うように座標変換されなくてはならない。衛星の軌道と姿勢などの情報は、画像パラメータファイル (Image Parameter File) に、座標変換ブロックデータとして格納されている。

緯経線と地図データは、円形系 FAX 画像作成の際、座標変換をほどこしてやらなくてはならない。そのため

変換に時間がかかっては困る。そこで以下のような、座標変換の方式を行なう。

緯経線及び地図データは、先に述べたように、FAX 基準グリッドファイルに格納されている。格納フォーマットは、経度と緯度の座標 (λ - ϕ 座標) 上の点列データとして、ある矩形領域 (パッチ) ごとに、与えられている。(Fig. 10(1)) この点列データを座標変換する場合、全点列データについて、座標変換ブロックデータを用いた座標変換をほどこしては、計算処理時間が長くなる。従って、パッチの4頂点についてのみ、座標変換ブロックデータを用いた、座標変換をほどこし、パッチ内に定義されている点列データには、2次元補間座標変換をほどこす。

座標変換によって得られた点列データは、VISSR 画像と同じ座標系 (ピクセルライン座標 (I-J 座標)) に変換されている。(Fig. 10(2)) I-J 座標に変換された緯経線と地図データは、VISSR 画像の変換と同様に、拡大又は、縮小変換によって、FAX 画面座標 (FAX のピクセルライン座標 (K-L 座標)) へ変換される。(Fig. 10(3))

この様にして得られた緯経線と地図データは、FAX 画面上で点列データとして表示されている。これら FAX 画面上での点列データは、FAX 定義テーブルに定義されている挿入形式に従って変換される。この時画面上で明りょうになるようにこれらの点列は、ライン方向あるいは、ピクセル方向に増殖される。増殖のしかたは、点線表示 (Dot Type) の場合、点列データの回りに、FAX

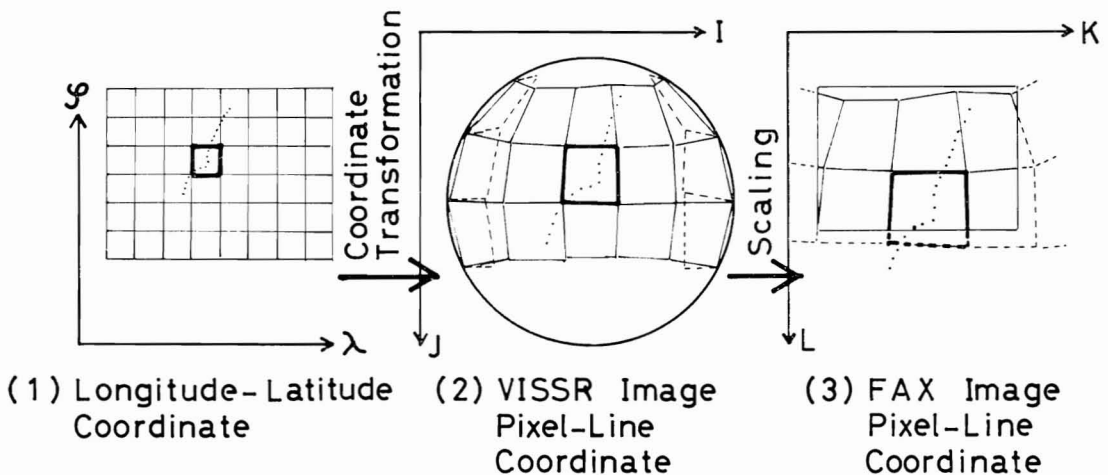


Fig. 10 Illustration of grids transformation for disk image. The grids points (λ , ϕ) to be melded with the FAX are transformed into (I, J) of VISSR pixel-line coordinate and scaled into (L, K) of FAX pixel-line coordinate.

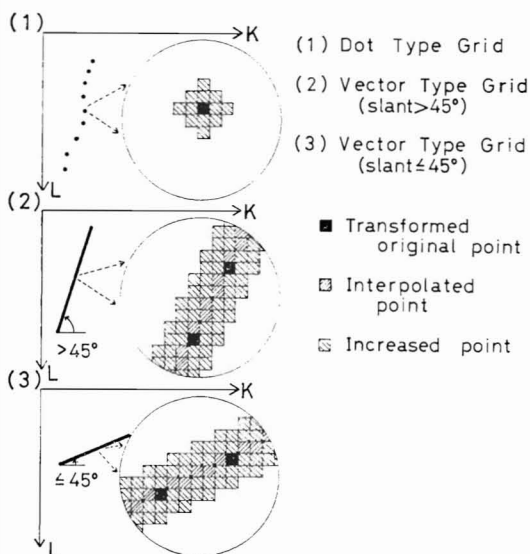


Fig. 11 Illustration of grids generation.

When thick dot line is used as earth locator grids, grid points are increased around original points, and when thick solid line is used as earth locator grids, grid points are interpolated between original points and increased around these points. The procedure makes earth locator grid evident on pictures.

定義テーブルに示された量のピクセルおよびライン分だけ増殖する。(Fig. 11(1)) また、実線表示 (Vector Type) の場合も画像上で明りょうになるように、まず隣合う点データの間をうめるように増殖し、次に、それらの回りに、ライン方向 (実線がライン方向に対して、45°以下の傾きを持つ場合) 又は、ピクセル方向 (実線がライン方向に対して、45°より大きな傾きを持つ場合) に増殖する。(Fig. 11(2), (3))

ベンチマークは、VISSR 画面上の固定位置に対応する FAX 画面上の位置に挿入される。挿入位置と挿入されるパターンは、FAX 定義テーブルに定義されている。

これらのデータは、FAX グリッドファイルに格納されて、画像変換プログラムに渡される。

3-2 画像変換プログラム

1) 拡大・縮小変換

画像変換プログラムは、補助図形作成プログラムが緯経線と地図データを変換する場合と異なり単に拡大・縮小変換を行なうのみである。

拡大するか、縮小するかは、各 FAX 画像ごとに異なる。変換率は、FAX 定義テーブルに定義されている VISSR 画像の被変換画面のピクセル数 (IV) とライン

数 (JV)、および、FAX 画像の地球画像領域のピクセル数 (IF) とライン数 (JF) の比によって与えられる。すなわち、ライン方向変換率は、

$$\rho_L = JF/JV$$

であり、ピクセル方向変換率は、

$$\rho_P = IF/IV$$

である。 ρ_L, ρ_P が 1 より大きい時は、拡大変換であり、小さい時は、縮小変換である。

FAX 画像の地球画像領域のピクセル数とライン数は、HR-FAX 画像で、9890 ピクセル × 4354 ラインであり、LR-FAX 画像では、1710 ピクセル × 742 ラインである。また、VISSR 画像の被変換画面のピクセル数とライン数は、次式により決められる。出力される地球画像の縮尺率を $1/\rho$ で表わすと

$$\rho = R_0 \frac{IV}{IF} \frac{A}{X} = R_0 \frac{JV}{JF} \frac{B}{Y}$$

の関係が有る。

ここで

R_0 = 衛星の高度

A = VISSR 画像の一画素のピクセル方向の視野角 (IR ; $47.95 \mu\text{rad}$, VIS ; $23.97 \mu\text{rad}$)

B = VISSR 画像の一画素のライン方向の視野角 (IR ; $140.0 \mu\text{rad}$, VIS ; $35.0 \mu\text{rad}$)

X = FAX 画像の一画素のピクセル方向の長さ (HR-FAX; 0.0535 mm , LR-FAX; 0.1222 mm)

Y = FAX 画像の一画素のライン方向の長さ (HR-FAX; 0.096 mm , LR-FAX; 0.261 mm)

この式から、 IV と JV は計算され、FAX 定義テーブルに書き込まれる。

IV と JV , IF と JF が決まったところで、拡大・縮小変換は、次式による。すなわち、FAX 画像の画素位置 (K, L) に対応させる VISSR 画像の画素位置 (I, J) は、

$$I = \left[I_0 - \frac{IV}{2} + \frac{1}{\rho_P} \times \left(K - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \right]$$

$$J = \left[J_0 - \frac{JV}{2} + \frac{1}{\rho_L} \times \left(L - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \right]$$

による変換を行なう。

ここで (I_0, J_0) は、VISSR 画像の被変換画面の投影中心画素の位置である。これは、円形 FAX 画像では、衛星直下点 (SSP) に相当する画素位置である。

なお、分割円形 FAX 画像作成の場合は、分割画像どうしオーバーラップしている所があるので、一分割画像ごとに変換を行なうと二度以上変換処理される画素がで

きる。そこで、全分割画像を、仮想的な地球画像領域に並べたとして、1度だけ変換を行ない、その後、LR-FAX 画像ファイルに格納する際に分割する。

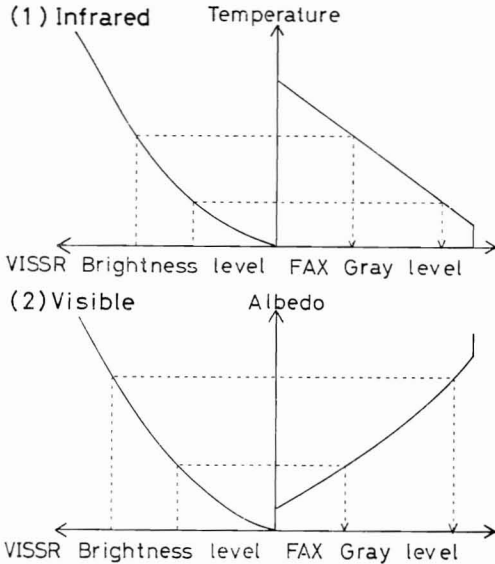


Fig. 12 Illustration of brightness conversion for FAX gray level. Brightness level of infrared (visible) VISSR image data are converted into temperature (albedo) and then converted into FAX gray level.

2) 輝度変換

VISSR 画像の赤外画像は階調が 256 レベルあり、また、可視画像は 64 レベルある。これに対し、FAX 画像データの階調は HR-FAX 画像も、LR-FAX 画像も 64 レベルである。輝度変換は VISSR 画像の 256 レベルを FAX 画像の 64 レベルにするためだけでなく、気象解析者が、FAX 画像から気象情報を収集しやすくするためにも必要である。

輝度変換には次の二つのテーブルが用いられる。一つは画像前処理の中で行なわれる、VISSR キャリブレーション処理で作成されたキャリブレーションテーブルである。もう一つは、FAX 定義テーブルに定義されている FAX 輝度変換テーブルである。前者は VISSR 画像の各レベルと、物理量である温度 (赤外画像) 又は、アルベドに依存する反射光量 (可視画像) との関係を示している。(VISSR 画像輝度—物理量変換 テーブル) これは、VISSR のセンサの状態等の変化により、そのつど書き換えられる。後者は、VISSR 画像から得られる物理量を FAX 画像のどの輝度に対応づけるかを示すテーブルである。(物理量—FAX 画像輝度変換テーブル) これは、FAX 画像の利用目的が変わらないかぎり、書き換えられない。

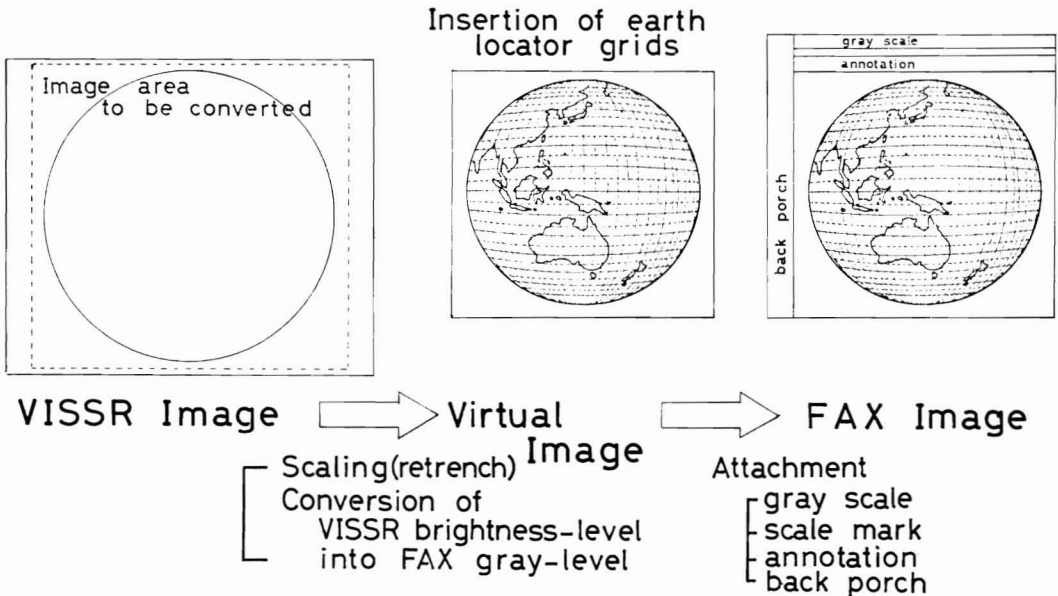


Fig. 1 Illustration of image processing for HR-FAX; full-disk image.

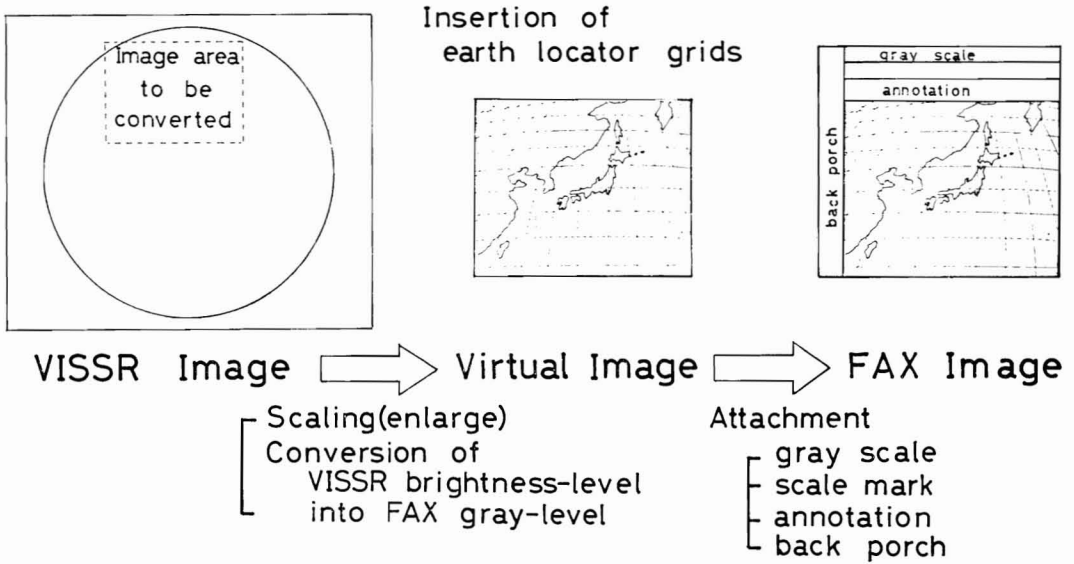


Fig. 14 Illustration of image processing for HR-FAX; enlarged partial-disk image.

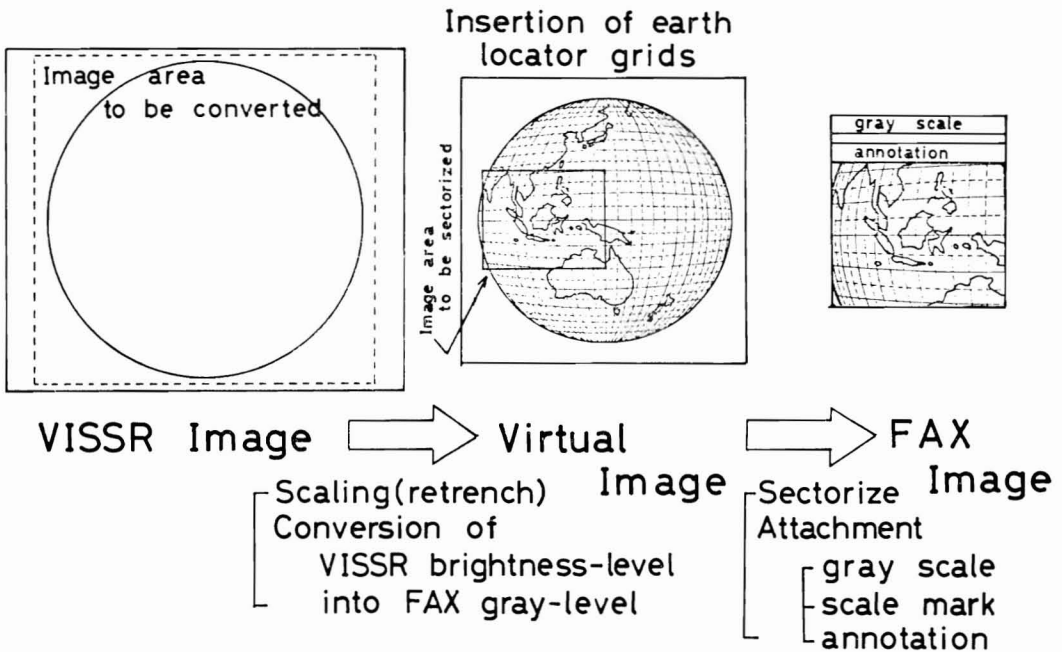


Fig. 15 Illustration of image processing for LR-FAX; sectorized image.

これら二つのテーブルから、輝度変換処理に先立ち、VISSR 画像輝度と FAX 画像輝度の対応テーブルが作られる。(VISSR 画像輝度—FAX 画像輝度変換テーブル) この変換テーブルを用いて、VISSR 画像の輝度から FAX 画像の輝度へ直接変換される。

この輝度変換の概念を Fig. 12 に示す。

3) 補助図形の付加及び挿入

アノテーション、グレースケール、スケールマークの付加は、補助図形作成プログラムから渡されるグレースケール・アノテーションファイルからそれぞれのデータ

を入力し、FAX 画像データファイルの先頭の位相信号の次に付加する。(Fig. 7, 8 参照)

緯経線及び地図データの挿入は、FAX グリッドファイルから得る、FAX 画像上での挿入位置情報に従って、FAX 画像の画素の輝度レベルを0または63にする。挿入する緯経線及び地図データの輝度レベルを0にするか、63にするかは、挿入される位置の FAX 画像の元の画素の輝度による。FAX 定義テーブルに、輝度反転レベルが定義されており、挿入される位置の元の画素の輝度レベルと比較して、画素の輝度レベルが輝度反転レベルより大きい時、挿入される緯経線又は地図データのレベルは、0である。これと逆の場合は、63レベルが挿入される。すなわち、FAX 画像の白っぽい部分には黒のグリッド等を、黒っぽい部分には白のグリッド等を挿入する。

これまで説明した処理の流れの概要を、Fig. 13, 14, 15 に示す。

4. 地図投影系 FAX 画像データの作成

地図投影系 FAX 画像の作成プログラムの構成を Fig. 16 に示す。

処理の流れは、円形系 FAX 作成の場合と同様、まず、FAX 補助図形作成プログラムが実行される。この

プログラムにより、グレースケール、スケールマーク、アノテーションの各データが作成される。しかし、円形系 FAX 画像作成の場合と異なるのは、FAX 画像作成のつど、緯経線と地図データの座標変換を行なう必要はない。なぜならば、地図投影系 FAX 画像に挿入される緯経線と地図データは、2000万分の1のポーラステレオ地図または、メルカトル地図の、それと同じであるから、一度作成しておけば、出力 FAX の種類の変更、または、緯経線と地図データの挿入形式の変更があるまでは、作成しなおさなくても良い。また、もう一つの異なる点は、このプログラムにより、次の FAX ブロック処理プログラムで必要な、ブロック頂点座標テーブルを、PS/MT 用座標変換テーブルファイルに作成する。

FAX ブロック処理プログラムは、FAX 補助図形作成プログラムにより、作成されたブロック頂点座標テーブルに従って、ブロックごとに、VISSR 画像から FAX 画像への地図変換を行なう。またこの時、輝度を FAX 用輝度に変換する。こうして得られたブロックごとに分けて変換された画像データは、画像ブロックデータファイルに格納される。

次に、FAX 画像編集処理プログラムにより FAX ブロック処理プログラムで作成されたブロックごとの画像データを、FAX 画像のライン単位のデータブロックに編集し、アノテーション、グレースケール、スケールマークを付加し、緯経線と地図データを挿入して、FAX 画像データを作成する。

次に個々の処理プログラムについて詳細に述べる。

4-1 補助図形作成プログラム

補助図形作成プログラムは、円形系 FAX 作成の項で述べているが、ここでは、円形系 FAX 作成の場合と異なる点についてのみ述べる。

1) 緯経線・地図データの作成

前出のように、FAX 画像作成のたびに、緯経線と地図データの作成をする必要はない。FAX グリッドファイルに格納されている緯経線と地図データは、初期の段階に一度作成されたものを、固定データとして、格納してある。

この緯経線と地図データの作成は、任意の時間に、一度実行されるだけなので、時間制約はない。従って、パッチごとの補間座標変換は行わず、座標変換ブロックデータを用いた座標変換を、緯経線と地図データのすべての点列に対して行なう。

2) ブロック頂点座標テーブルの作成

ブロック頂点座標テーブルは、地図投影系 FAX 画像作成において、VISSR 画像データをブロック単位で処

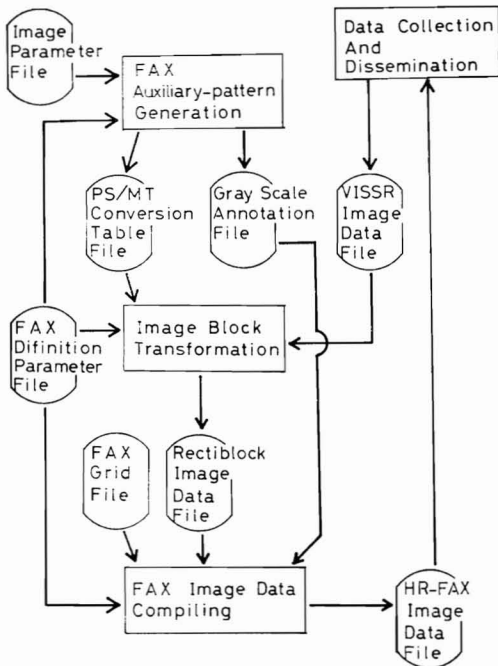


Fig. 16 Design overview of FAX production program for Mapped image.

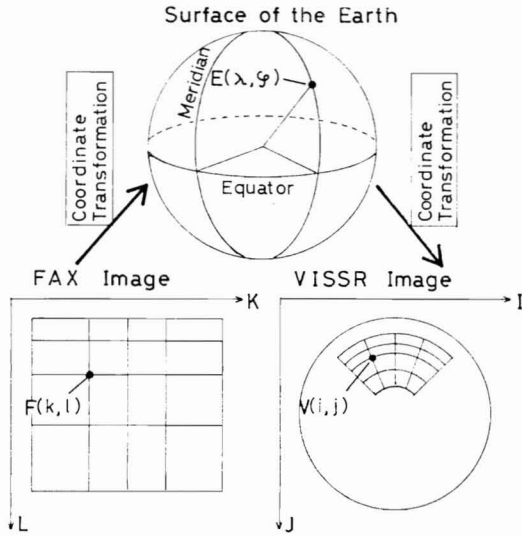


Fig. 17 Illustration of generating “Conversion Table for PS/MT projection.”
 Vertexes (K, L) of each block are transformed into corresponding points (λ, φ) on earth surface and then into points (I, J) of VISSR image.

理するため、ブロックに区分けするための情報（矩形ブロックの頂点座標）のテーブルである。

FAX 画像を、いくつかの矩形ブロックに分けておく。これらの大きさは、処理時間とブロック内の補間変換による誤差が効率的に小さくなるように決められている。（ブロックの大きさが大きくなると、FAX 画像をカバーするブロックの数が少なく、処理時間は少なくなる。しかし、補間誤差が大きくなるので、ブロックの大きさは、むやみに、大きくできない。）これらのブロックの各頂点の FAX 画面におけるライン番号とピクセル番号は、FAX 定義テーブルに、定義されている。このライン番号 (K) とピクセル番号 (L) から、VISSR 画面上の頂点座標、つまり、ライン番号 (I) とピクセル番号 (J) を求めて、ブロック頂点座標テーブルを作成する。Fig. 17 に示すように、まず FAX 画面上の点 (K, L) を、地球上の緯度・経度に変換し、その緯経度から、衛星の軌道・姿勢等の情報の書かれている座標変換ブロックのデータを用いて、VISSR 画面上の点 (I, J) に座標変換する。このようにして計算された (I, J) は、次のブロック処理プログラムへ、PS/MT 用座標変換テーブルファイルによって渡される。

4-2 FAX ブロック処理プログラム

補助図形作成プログラムによって作成されたブロック頂点座標テーブルに従って、FAX ブロック処理プロ

ラムを用いて、VISSR 画像データが読み込まれる。読み込まれた VISSR 画像データに対し FAX ブロック処理プログラムを介して、補間座標変換が行なわれる。Fig. 18 に示すように、FAX 画面上のブロックの頂点を、 $F_1(K_1, L_1), F_2(K_2, L_1), F_3(K_1, L_2), F_4(K_2, L_2)$ として、それに対応する VISSR 画面上のブロックの頂点を $V_1(I_1, J_1), V_2(I_2, J_2), V_3(I_3, J_3), V_4(I_4, J_4)$ とすると、FAX 画面上のある画素 $F(k, l)$ に、対応する VISSR 画像の画素 $V(i, j)$ は、次式により求まる。

$$i = I_1 + \frac{m}{s} (I_2 - I_1) + \frac{n}{t} (I_4 - I_1) + \frac{mn}{st} (I_1 - I_2 - I_1 + I_3)$$

$$j = J_1 + \frac{m}{s} (J_2 - J_1) + \frac{n}{t} (J_4 - J_1) + \frac{mn}{st} (J_1 - J_2 - J_4 + J_3)$$

ここで

$$\frac{m}{s} = \frac{k - K_1}{K_2 - K_1} \quad \frac{n}{t} = \frac{l - L_1}{L_2 - L_1}$$

である。

このようにして求められた、VISSR 画面上の画素は、円形系 FAX 画像作成の場合に行なわれたと同様の、輝度変換をほどこされて、ブロック単位に分けられた FAX 画像の画素として、当てられる。この処理によって、FAX ブロックデータが、ブロックデータファイルに作成される。

4-3 FAX 編集処理プログラム

FAX ブロック処理によって作られた、FAX ブロックデータは、FAX 画面上でのブロック単位のデータである。FAX 画像データは、ライン単位のデータであるから、いくつかのブロックから、組みなおして、ライン単位になおさなくてはならない。FAX 編集処理プログラムは、この処理を実行すると同時に、アノテーション、グレースケール、スケールマークの付加と、緯経線と地図データの挿入を行なう。

5. エラーラインの処理

FAX 画像作成のうえで、考えておかななくてはならないことは、VISSR 画像データの、障害等によるラインぬけや、信頼性のないライン（これらをすべて含めてエラーラインという）に対する処理である。

VISSR 画像データにエラーラインが有る場合には、そのエラーラインの前後、5 ライン以内の最も近い正常

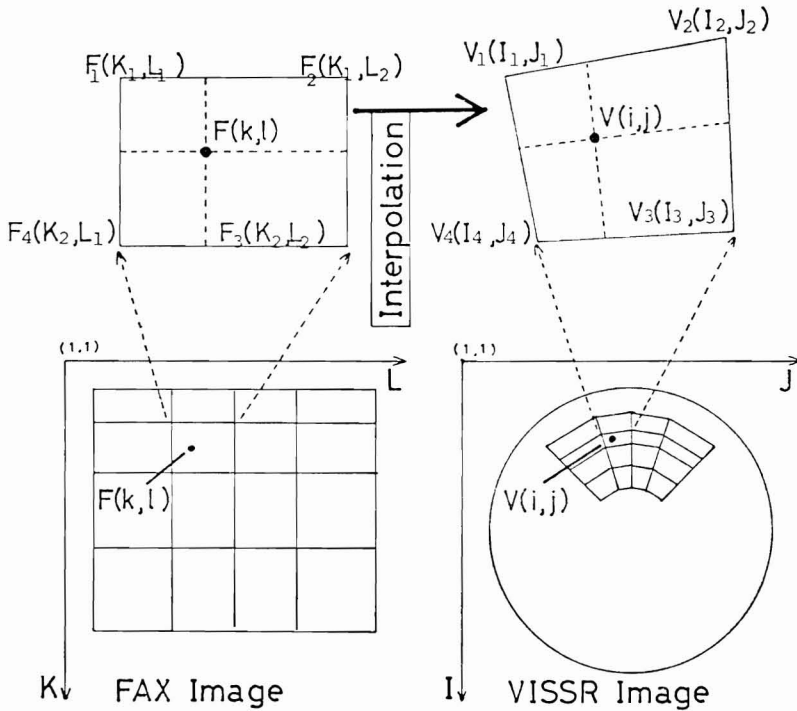


Fig. 18 Interpolation of the location of a pixel.
Pixel of VISSR image corresponding with the pixel of FAX image

$$i = I_1 + \frac{m}{s}(I_2 - I_1) + \frac{n}{t}(I_4 - I_1) + \frac{mn}{st}(I_1 - I_2 - I_4 + I_3)$$

$$j = J_1 + \frac{m}{s}(J_2 - J_1) + \frac{n}{t}(J_4 - J_1) + \frac{mn}{st}(J_1 - J_2 - J_4 + J_3)$$

$$\frac{m}{s} = \frac{k - K_1}{K_2 - K_1} \quad \frac{n}{t} = \frac{l - L_1}{L_2 - L_1}$$

ラインの同じピクセル番号の画素を代用する。このため FAX 画像は、VISSR 画像に10ライン以上の連続したエラーラインが発生しなければ、データぬけ(黒くなる)がなく、一寸見ただけでは、エラーラインがあったかど

うかは、わからない。10ライン以上のエラーラインが発生した場合、FAX 画像には、発生したエラーラインより10ライン少ないラインに相当する部分にデータぬけが生じる。

気象衛星センター技術報告

編集委員会

委員長 神子敏朗

編集委員 井石明宏，井手和夫，加藤一靖，
北谷 茂，清水喜允，高山豊治，
長谷川隆司，福井徹郎，前橋紀恵子

昭和54年9月14日発行

編集兼
発行所 気象衛星センター
東京都清瀬市中清戸 3-235

印刷所 学術図書印刷株式会社
東京都練馬区豊玉北 2-13
電話 (991) 3 7 5 4 番

METEOROLOGICAL SATELLITE CENTER
TECHNICAL NOTE (SPECIAL ISSUE II—1)

SUMMARY OF GMS SYSTEM

II DATA PROCESSING

Part 1

METEOROLOGICAL SATELLITE CENTER
JAPAN
SEPTEMBER 1979