

NOAA衛星の画像位置合わせの精度向上 Improvement of AVHRR/HIRS Navigation

木川 誠一郎*
Seiichiro Kigawa

Abstract

The images of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on board the NOAA satellites have 1.1km spatial resolution at the sub-satellite point. The full spatial resolution of the AVHRR images become operative with an accurate navigation. In order to improve the accuracy of the navigation, following software have been developed at the Meteorological Satellite Center.

- 1) Orbit Prediction — calculates the accurate position of the NOAA satellites using the orbital elements which is transmitted in the TBUS bulletin.
- 2) Orbit Correction — calculates the navigation error of the “Orbit Prediction” using the fixed platforms of ARGOS Data Collection System based on A Location Algorithm of ARGOS Data Collection Platform (Takeuchi, 1990).
- 3) Automatic Landmark Extraction — calculates the navigation error of the AVHRR image where small windows of the image are correlated with reference landmarks.
- 4) Coordinate Transformation — is sub-routine to use the conversion of the line and pixel numbers in the image into latitude and longitude and vice versa with the adjustment of “Orbit Correction” or “Automatic Landmark Extraction”.

The Orbit Prediction was come into operation on April 1, 1992, and the Orbit Correction, Automatic Landmark Extraction and Coordinate Transformation were come into operation on October 1, 1993.

1. はじめに

TIROS-N衛星シリーズ(以下「NOAA衛星」)に搭載されているAVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)は、5つのチャンネル(可視1, 赤外4)を持ち、各チャンネルとも輝度分解能は10ビット、空間分解能は衛星直下点

で1.1kmである。この高分解能のメリットを生かすためには、高精度のキャリブレーションとナビゲーション(画像位置合わせ)が必要である。

これまで、気象衛星センターのNOAA衛星の画像位置合わせは誤差が大きく、AVHRR画像データの利用上の問題点であった。そこで、NOAA衛星の画像位置合わせの精度向上を目指し、新たに

*気象衛星センター システム管理課
(1993年10月7日受領, 11月9日受理)

4つのプログラムを開発した。

2. 軌道計算プログラム

気象衛星センターのNOAA衛星データ処理における軌道計算プログラムは、アメリカのNOAA/NESDISからGTS, ADESS経由で送られてくる軌道情報(気象衛星センターでは通称APT情報と呼んでいる:例をTable 1に示す)をもとに、気象衛星センターで受信可能な軌道に対する衛星の位置と速度を計算し、極軌道気象衛星通過点ファイルに格納するプログラムである。格納されたデータはHIRS(High Resolution Infrared Radiometer Sounder)やAVHRRの各画素の緯経度算出に使用される。

従来の軌道計算プログラムは、APT情報のPART IとPART IIに含まれる2分毎の衛星の位置を外挿していた(中島他, 1983)。このため、衛星の位置の予測誤差が大きく、これが画像位置合わせの誤差の要因の一つとなっていた。

そこで、軌道計算の精度向上を目指してAPT情報のPART IVの軌道要素(カルテシアン軌道要素:衛星の位置と速度)と摂動量から衛星の位置を算出するプログラムを開発した。

人工衛星の軌道は、ケプラーの法則にもとづく二体問題の解から時間とともにずれて行く。このずれは、地球重力ポテンシャルの非球対称成分、太陽と月の引力、大気抵抗、太陽輻射圧などが原因であり、NOAA衛星のような極軌道衛星では、軌道は複雑に変化する。長谷川(1985)は、特別摂動法によるNOAA衛星の軌道計算を試みており、高精度の軌道計算が可能と報告されている。特別摂動法とは、衛星の運動方程式を数値的に時間積分することにより軌道生成を行う計算法である。今回開発した軌道計算プログラムは、特別摂動法に比べると精度は悪いが、外挿による方法よりも精度が良く計算が簡単な一般摂動法を採用した。一般摂動法を採用した理由は、最終目標が画像位置合わせの精度向上であり、軌道計算の誤差を含

Table 1 Example of TBUS bulletin.

```

TBUS01 KWBC 291900
APT PREDICT
0101 NOAA 12
PART I
08501 00120 03126 01457 T0118 L2532
85050 31640 11588
85091 00155 24280
85131 64709 34149
NIGHT PART II
02810 070161 04810 141177 06810 212194
08810 282212 10810 353232 12810 423255
14820 492282 16820 561316 18820 629363
20830 695435 22830 756563 24830 802829
26831 809277 28831 770601 30831 712755
32832 647762 34832 580710 36832 511673
NIGHT PART III
02815 070129 04815 141113 06815 212096
08815 282078 10825 352059 12825 422036
14825 492009 16838 561024
DAY PART II
38832 442644 40832 373620 42832 303600
44822 233581 46822 162564 48822 092548
50822 021532
DAY PART III
52827 048516 54837 119500 56837 189484
58837 259466 60837 329447 62837 399426
64837 469400 66847 537369 68847 605328
70847 672267 72847 735165 74847 788964
76848 813564 78848 788163 80835 734037
82835 671139 84835 605199 86835 537241
PART IV
1991 032A 08489 001010912924 930101001542877 1045970
01012495 01013103 00126218 33968367 03395739 09867492
02039156 07193303 P059642325 P040164690 M000000001
P00623313 M00934374 P07366325 004961645 127139009 9449
0000500000 M00307025 P00098363 P00512002 SPARESPARE
APT 137.50 MHZ, HRPT 1698.0 MHZ, BCN DSB 136.77 MHZ. APT VIS
CH 2 /0.725 TO 1.0/ AND IR CH 4 /10.5 TO 11.5/ XMTD
CONTINUOUSLY. DCS CLK YR/DAY/TIME 1992 013 19707.394 LA
ST TIP CLK CORR 07/28/92 CLK ERR AFTR CORR MINUS 0.6 SEC.
CLK ERR AS OF 12/21/92 MINUS 0.50 SEC. ERR RAT
E AS OF 12/21/92 UNKNOWN. NEXT CLOCK CORR UNKNOWN.
NOAA 12 MSU CH 4 HAD NOISE IN THE SPACE CALIBRATION FROM S
EP 19 THRU OCT 14. THE NOISE HAS NOW SUBSIDED TO ITS
NOMINAL LEVEL.
    
```

む画像位置合わせの誤差を補正する技術(後述)を合わせて開発するので、一般摂動法による計算精度で充分であるからである。

このプログラムは1992年4月より運用で使用され、衛星位置の予測値の精度が向上したことに伴い、画像位置合わせの誤差が小さくなっている。

3. ARGOS軌道ずれ補正プログラム

ARGOS軌道ずれ補正プログラムは、竹内(1990)が開発したARGOS・DCP位置算出プログラムを改造し、軌道のずれを算出できるようにしたものである。

ARGOSシステムは、NOAA衛星を用いて運用されているデータ収集システム(DCS: Data Collection System)である。極軌道衛星であるNOAA衛星を利用しているARGOSシステムは、GMS等の静止衛星を利用したDCSに比べ、衛星がDCP(Data Collection Platform)の上空にある時しかデータ収集ができない欠点はあるが、1つの衛星で極域を含む全球データを収集でき、さらにドップラーシフトを利用してDCPの位置を測定する測

位機能を持っている。そこで、送信周波数が安定し、設定位置が既知な固定DCPのデータから衛星の軌道計算の精度を向上させることが可能である。つまり、ドップラーシフトから推定したDCPの位置と実際の位置の差を軌道のずれとするわけである。竹内(1990)によれば、DCPの位置決定誤差は3 km程度であり、後述するランドマーク抽出より精度は悪いが、DCPデータは曇天域や海岸線の少ない太平洋上でも軌道のずれの推定が可能であり、有効性が大きい。

ARGOS軌道ずれ補正プログラムは、1993年10月から運用で使用される予定である。

4. AVHRRランドマーク自動抽出プログラム

AVHRRランドマーク自動抽出プログラムは、AVHRR画像からランドマーク(特徴地形)の位置を抽出し、画像のずれを決定するプログラムである。

ランドマーク抽出のアルゴリズムはフランスのCMS(Centre de la Meteorologie Spatiale)で開発された方法(Brunel, 1991)を参考にして開発した。

ランドマークの位置を決定するためには、比較対象となる地形データ(テンプレートと呼ぶ)が必要である。GMSの場合は、固定(すべての画像に対して同一)のテンプレートを使用しているが、NOAA衛星の場合は、軌道ごとにテンプレートの形が変わるため、固定のテンプレートは使用できない。つまり、NOAA衛星では衛星と地表の位置関係によって地形の見え方が異なるため、軌道ごとにテンプレートを作成しなければならない。

また、GMSのランドマーク抽出プログラムでは可視画像からランドマーク抽出を行っており、赤外画像からは抽出できない。今回開発したプログラムでは可視、赤外両方の画像に対応しており、夜間でもランドマーク抽出ができる。将来、NOAA衛星で蓄積した赤外画像からのランドマーク抽出のノウハウがGMSへ反映できると考えられる。

AVHRRランドマーク自動抽出プログラムは、1993年10月から運用で使用される予定である。

4. 1 テンプレート作成

衛星から見た計算上の地形(テンプレート)は、後述する座標変換ルーチンを用いて地図データから作成する。AVHRRの分解能は衛星直下点で1.1kmであるので、地図データは1 kmの分解能が要求される。つまり、1 kmごとに海、陸、海岸線を識別できることが必要になる。今回の開発では海岸線データから緯経度0.01度ごとに海、陸、海岸線を識別できる地図データを作成した(Fig. 1)。

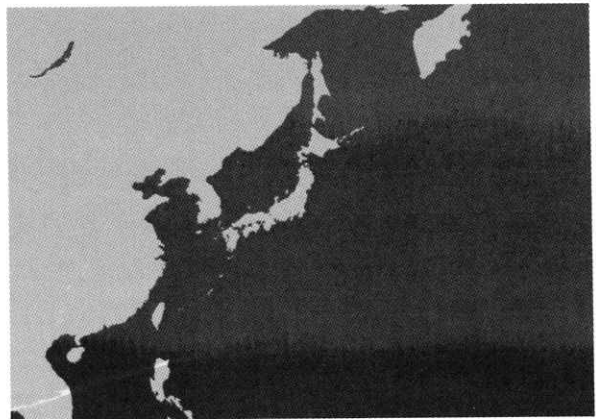


Fig.1 General view of map data.

4. 2 海陸画像の作成

テンプレートの中心に対応するAVHRR画像の画素を後述する座標変換ルーチンを使用して予測する。この予測画素を中心に121×121画素のAVHRR画像をHRPTデータから切り出し、各画素を海と陸に判別した海陸画像を作成する(Fig. 2)。

海陸画像を作成するために使用するチャンネルは昼と夜で異なる。昼の画像ではチャンネル1と2から次のインデックスを作成する。

$$NDVI = \frac{(\text{channel 2} - \text{channel 1})}{(\text{channel 2} + \text{channel 1})}$$

このNDVI(Normalized Difference Vegeta-

tion Index)が負の時が海, 正の時を陸とする。夜の画像では, チャンネル4 (11 μ m)とチャンネル5 (12 μ m)の差から海陸画像を作成する。この差の値(T4-T5)は, 海より陸の方が小さいので, 適当なしきい値を用いて海と陸の判定を行う。海と陸のしきい値は, 切り出したAVHRR画像の全画素のチャンネル4と5の差の平均値を採用している。昼と夜の判別は, 太陽天頂角(しきい値は80度)により行う。

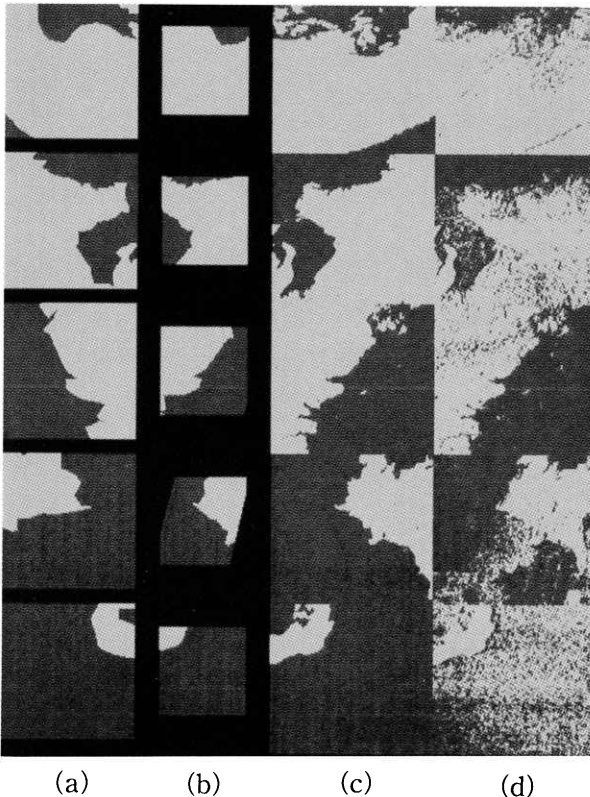


Fig.2 Examples of template and land-sea image.

(a) map data of reference window

(b) template

(c) land-sea image which is constructed using NDVI.

The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is defined by:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{channel 2} - \text{channel 1}}{\text{channel 2} + \text{channel 1}}$$

(d) land-sea image which is constructed using the brightness temperatures of the infrared channels 4 and 5 (channel 4 temperature - channel 5 temperature).

4. 3 雲量の算出

切り出したAVHRR画像の全画素について, 固定のしきい値(観測輝度レベル値)を使用して晴天判別を行いランドマークの雲量を算出する。

4. 4 ランドマーク位置の決定

テンプレートと海陸画像はともに, 二値(陸+海岸線, 海)画像である。海陸画像に対してテンプレートを1画素ごと移動させ, テンプレートと海陸画像の値の一致する画素が最も多い位置をランドマーク位置とする。

4. 5 画像ずれ量の算出

抽出したランドマーク位置から画像ずれ量を算出する。画像のずれ量は1シーン(軌道)内でほぼ同じ傾向を持つので, 1シーン(軌道)に1組(ライン, ピクセル)の画像ずれ量を算出する。

画像ずれ量は, 抽出したランドマークのずれ量の重み付き平均値とし, 各ランドマークの重みは, テンプレートと海陸画像の値の一致した画素が多いほど大きく, 雲量が多いほど小さくする。

4. 6 ランドマーク抽出の精度

ランドマーク抽出の精度は, マンマシン処理によるランドマーク抽出データと比較して評価した。

人が抽出したランドマーク位置と比較して, ピクセル方向はよく一致しているがライン方向は1~3ラインのずれが見られる。テンプレートを作成するために使用している地図データの精度を考慮すれば, 十分な精度と言える。

また, 264軌道に対して実施したランドマーク抽出試験では, 164軌道(62%)で画像ずれが算出できた。算出ができなかった軌道の多くは, 海岸線の分布が少ない太平洋上または大陸上を通過する軌道である。

Table 2 Accuracy of automatic landmark matching estimated from man-machine landmark matching

HRPT reception time	Satellite	Line error	Pixel error
90-03-02 03:17:27 UTC	NOAA-11	- 2. 0	- 0. 6
90-03-05 04:25:03 UTC	NOAA-11	- 1. 2	0. 0
90-03-12 04:50:46 UTC	NOAA-11	- 1. 1	- 0. 4
90-03-16 04:07:12 UTC	NOAA-11	- 3. 3	- 0. 3
90-03-19 03:35:15 UTC	NOAA-11	- 2. 7	0. 3
90-03-19 05:16:55 UTC	NOAA-11	- 1. 2	0. 0

5. 座標変換ルーチン

座標変換ルーチンは、AVHRRとHIRSの各画素と地表面上の緯経度の対応を算出するルーチンである。AVHRRランドマーク自動抽出プログラムとARGOS軌道ずれ補正プログラムで算出した画像ずれ量を補正でき、高精度の座標変換が可能である。GMSの高速座標変換ルーチンをベースに開発しており、太陽天頂角等の情報を算出できる。従来の座標変換に比べ、通過点ファイルを使用せずAPT情報から衛星の位置を計算する。

6. データフロー

軌道計算プログラム、ARGOS軌道ずれ補正プログラム、AVHRRランドマーク自動抽出プログラム、座標変換ルーチンのデータフローをFig. 3に示す。

7. まとめ

AVHRR画像データの高分解能のメリットを生かすためには、高精度の画像位置合わせが必要である。これまで、NOAA衛星の画像位置合わせは

誤差が大きくAVHRR画像データ利用の障害の1つになっていたが、新しいプログラムの開発により、この障害は取り除かれた。

参考文献

- 竹内義明 1990 : ARGOS DCP 位置決定アルゴリズム。気象衛星センター技術報告第20号, 1-10.
- 中島忍, 青木忠生 1983 : TIROS-N 衛星シリーズの軌道計算。気象衛星センター技術報告特別号, TOVSデータ処理システムの解説, 49-55.
- 長谷川秀行 1985 : 特別摂動法を用いた極軌道衛星の軌道計算について。気象衛星センター技術報告第12号, 33-44.
- Brunel, P., 1991 : Automatic adjustment of AVHRR navigation, 5TH AVHRR DATA USERS' MEETING PROCEEDINGS, EUMETSAT, EUM P 09, 41-46.
- Kigawa, S., 1991 : A Mapping Method of VISSR Data. Met. Sat. Ctr. Tech. Note, No. 23,15-35.

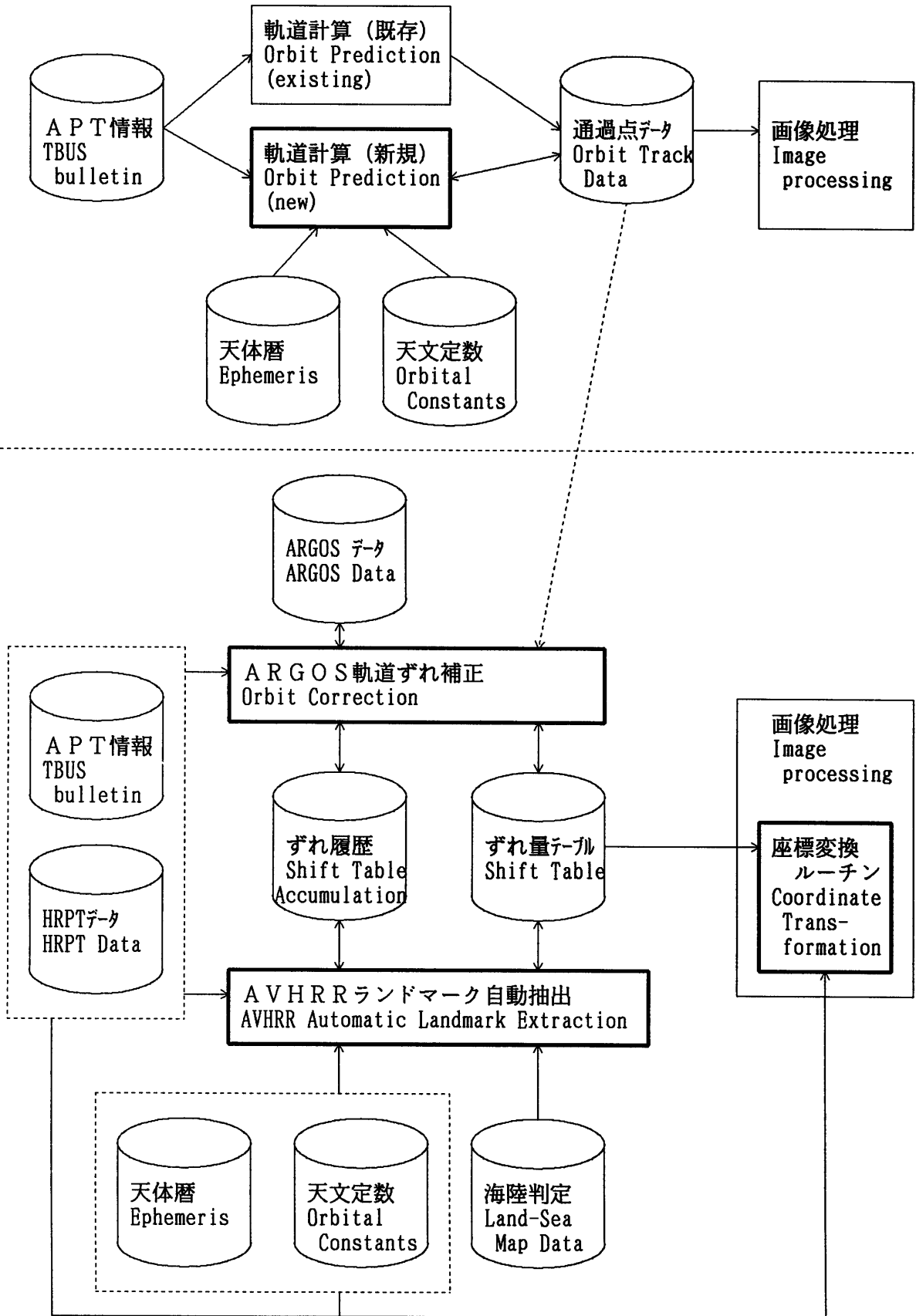


Fig.3 General flow of NOAA satellites navigation.