

# 科学衛星光学トラッキング装置の追跡プログラム\*

平山 智啓\*\*・古川 麒一郎\*\*

## Tracking Program for the Optical Satellite Tracking System

By

Tomohiro HIRAYAMA and Kiichiro HURUKAWA

**Abstract:** The Tracking program for the optical satellite tracking system is described. Its function is to obtain output data such as the required camera positions (azimuth, elevation, tracking and polar axes), the camera tracking speeds, and the right ascension and the declination of the satellite from its orbital elements as the input to the computer (NEAC-2200-400) in Kagoshima Space Center.

### 概 要

衛星光学トラッキング装置の追跡プログラムについて述べる。予測データは観測所内にある計算機 (NEAC-2200-400) に目的の衛星名、日付および軌道要素を入力して、カメラ位置 (仰角, 水平角, 追尾角, 極角), 追跡角速度および衛星の赤経・赤緯などの値が出力される。

内之浦における人工衛星光学追跡に際して必要な予報の計算について述べる。シュミットカメラを衛星の予報位置と速度に合わせて設定するための諸数値は、次のような手順で得られる。

#### 1. 衛星の高度・方位角を算出

- 1-1. 予報を出すべき時刻の軌道要素を求める。
- 1-2. 衛星の地心位置を求める。
- 1-3. 観測地点の地心位置を求める。
- 1-4. 観測地点と衛星を結ぶベクトルを求める。
- 1-5. このベクトルの方向を地平座標 (高度・方位角) に変換する。  
一連の高度・方位角からシュミット・カメラの設定値 (EL, TR, AZ 各軸およびトラッキング速度) を計算。

---

\* 宇宙研特別事業費による論文

\*\* 東京天文台

- 2-1. 2個の予報位置を通る大円を決定する (EL および AZ 軸の設定値が決まる).
  - 2-2. その大円と地平線との交点から予報位置までの角を求める (TR 軸の設定値が得られる).
  - 2-3. 両位置間の角度と時刻差とからトラッキング速度を出す.
- 上記の順序にしたがって, 予報計算プログラムの内容を記そう.

### 1-1. 軌道要素

データとして与える軌道要素は次の通りである.

- (1) 元期  $T_0$
- (2) 近地点引数  $\omega_0$  およびその日変化  $\omega_1$
- (3) 昇交点赤経  $\Omega_0$  およびその日変化  $\Omega_1$
- (4) 軌道傾斜  $i$
- (5) 離心率  $e_0$  およびその日変化  $e_1$
- (6) 半長径  $a$
- (7) 元期平均近点離角  $M_0$ , 平均運動  $M_1$ , 2次項の係数  $M_2$

要素の読み込みは SUBROUTINE READEL によって行なわれる. 半長径  $a$  は必ずしも与える必要がなく, もしデータの中に入らない場合は  $a = (274.53848/M_1)^{2/3} \times 1000$  で計算される. 角  $\omega$ ,  $\Omega$ ,  $i$  はその日の赤道および春分点を基準として測ったものを用いる.

予報時刻  $t$  における要素は, SUBROUTINE ELEM によって  $\omega = \omega_0 + \omega_1(t - T_0)$ , ...,  $M = M_0 + M_1(t - T_0) + M_2(t - T_0)^2$  で計算される.

### 1-2. 衛星の地心位置

まず SUBROUTINE KEPLER によって離心近点離角  $E$  を求める. これはケプラーの方程式  $M = E - e \sin E$  によって, 近点離角  $M$  および離心率  $e$  と結びつけられている. その解法は多種あるが, ここではケプラーの方程式を変形して得られる

$$E - M = e \sin M \cos (E - M) + e \cos M \sin (E - M)$$

を用い,  $E - M$  の初期値を 0 として, 前回の値との差が  $10^{-7}$  ラジアン以下になるまで繰返しを行なっている.

こうして得られた  $E$  を用いて, 地球中心を原点とした赤道座標系 (春分点方向を X 軸, 北極方向を Z 軸とする右手系) による衛星の位置は

$$\begin{aligned} x &= a[(\cos E - e) \cos \omega - \sqrt{1 - e^2} \sin E \sin \omega] \cos \Omega - a[(\cos E - e) \sin \omega \\ &\quad + \sqrt{1 - e^2} \sin E \cos \omega] \cos i \sin \Omega \\ y &= a[(\cos E - e) \cos \omega - \sqrt{1 - e^2} \sin E \sin \omega] \sin \Omega + a[(\cos E - e) \sin \omega \\ &\quad + \sqrt{1 - e^2} \sin E \cos \omega] \cos i \cos \Omega \\ z &= a[(\cos E - e) \sin \omega + \sqrt{1 - e^2} \sin E \cos \omega] \sin i \end{aligned}$$

と表わされ, プログラムでは X(5, 1), X(5, 2), X(5, 3) に格納される.

### 1-3. 観測地点の地心位置

SUBROUTINE STACO によって, 観測地点の東経 ( $\lambda$ ), 北緯 ( $\varphi$ ), 標高 ( $h$ ) から, 赤道およびグリニッジ子午線の交点方向を X 軸とし, 北極方向を Z 軸とした回転地心直角座標が

次のように求められる。

$$\begin{aligned}x &= (6378.16/\sqrt{1-0.006694541854 \sin^2 \varphi} + h) \cos \varphi \cos \lambda \\y &= (6378.16/\sqrt{1-0.006694541854 \sin^2 \varphi} + h) \cos \varphi \sin \lambda \\z &= (0.993305458146 \times 6378.16/\sqrt{1-0.006694541854 \sin^2 \varphi} + h) \sin \varphi\end{aligned}$$

プログラムでの格納場所は X(1, 1), X(1, 2), X(1, 3) である。

また、予報を出すべき日付の MJD (Modified Julian Date) からその日の世界時 0<sup>h</sup> におけるグリニジ恒星時  $\theta$  は

$$\begin{aligned}T &= (\text{MJD} - 15019.5)/36525 \\ \theta_0 &= 2\pi(23925.836 + 8640184.542T + 0.0929T^2)/86400\end{aligned}$$

(ラジアン)

予報時刻 (世界時  $t^s$ ) のグリニジ恒星時  $\theta$  は

$$\theta = \theta_0 + 0.00007292115859t$$

から求められ、前記の回転地心座標は、次式によって春分点基準の地心直交座標に変換される。

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \theta - y \sin \theta \\y' &= x \sin \theta + y \cos \theta \\z' &= z\end{aligned}$$

これらの値は X(2, 1), X(2, 2), X(2, 3) に格納される。

なお MJD は 1858 年 11 月 17 日世界時 0<sup>h</sup> から起算した通日で、年・月・日をそれぞれ I, J, K とするとき次の FORTRAN 文関数で求められる [1]。

$$\begin{aligned}\text{MJD}(I, J, K) &= K - 678876 + 1461*(I + (J - 14)/12)/4 + 367*(J - 2 - (J - 14)/12*12)/12 \\ &\quad - 3*((I + 4900 + (J - 14)/12)/100)/4\end{aligned}$$

#### 1-4. 観測地点から見た衛星の位置

1-2 および 1-3 の結果から、観測地点と衛星を結ぶ位置ベクトルは X(6, 1) = X(5, 1) - X(2, 1) 等の式によって直ちに求められる。これらは赤道および春分点を基準とした座標系での値なので、衛星の赤経、赤緯、距離に難なく変換される。

#### 1-5. 高度・方位角

X(5, 1), X(5, 2), X(5, 3) から、1-3 で行なったとは逆向きの座標回転によって回転地心直角座標系における衛星の地心位置が求まり、これと X(1, 1), X(1, 2), X(1, 3) との差のベクトルから、座標系を経度および緯度の分だけ回転させ、極座標に変換することによって、衛星の高度および方位角が算出される。

## 2. シュミット・カメラ設定値

シュミット・カメラは、極軸のほかに 3 本の回転軸を有しており、天球上の任意の点を通り任意の方向角をもった大円にそって任意の速度で衛星を追尾することができる。人工衛星の見かけの経路は単純な大円等ではなく、速さも一定でないが、現実に観測の対象となる衛星の大部分は、1<sup>m</sup> 程度以内の時間ならば大円上を等速追尾していても露出時間 (0<sup>s</sup>.5, 1<sup>s</sup>, 2<sup>s</sup> あるいは 4<sup>s</sup>) 中における像の移動は顕著でなく、位置測定に使用できることが経験上しら

れている。

(30°あるいは1<sup>m</sup>の時間間隔をへだてた)衛星の見かけの位置を表わすベクトルを  $A$  および  $B$  としよう。  $C=B \times A$  は両位置を結ぶ大円の極である。天頂を向いているベクトル  $Z$  と  $C$  との間の角 (これは FUNCTION XYKAKU によって求められる) を 180° から減じたものは EL 軸の設定値となる。  $Z$  と  $C$  できまる平面内にあり  $Z$  に垂直なベクトル  $D$  (これは SUBROUTINE ORT によって求められる) と、北点を向いたベクトル  $N$  との間の角から AZ 軸の設定値が求められる。  $E=C \times Z$  は、  $A$ 、  $B$  を結ぶ大円と地平線との交点であり、  $E$  と  $A$  との間の角から TR 軸の設定値が求まる。  $A$ 、  $B$  間の角を時間間隔で割ればトラッキング速度が得られる。

以上がシュミット・カメラの設定値を求める SUBROUTINE BNSET の内容である。

実際の予報計算においては、さらに (1) 衛星高度 10° 以上、 (2) 太陽高度 -10° 以下、 (3) 衛星に太陽光線が当たっている、の3条件を調査し (SUBROUTINE COND によって行なわれる)、観測可能な経路についてのみ予報のプリントと制御用紙テープの出力を行なっている。

予報計算のプログラムは、元東京大学東京天文台助教授竹内端夫博士 (現宇宙開発事業団参事) が、東京天文台における人工衛星観測のために開発されたものを基礎としたことを記し、感謝の意を表したい。

1974年5月30日

#### 参 考 文 献

- [1] H. F. Fliegel, T. C. Van Flandern: A Machine Algorithm for Processing Calendar Dates, Communications of the ACM, Vol. 11, No. 10, p. 657, Oct. '68.