

科学衛星光学トラッキング装置 I

齊藤 成文・古在 由秀*
富田 弘一郎*・長谷部 望**

An optical satellite tracking system (I)

By

Shigeibumi SAITO, Yoshihide KOZAI, Koichiro TOMITA,
and Nozomu HASEBE

Abstract: An optical satellite tracking system was established for the scientific satellite project in Kagoshima Space Center, University of Tokyo.

The paper describes the requirement for the system performance and the fundamental system design of the optical satellite tracking system. It was decided to adopt a Schmidt system which has four movable axes including the polar axis and is equipped with the semi-automatic control system for satellite tracking.

概 要

科学衛星プロジェクトの一環として作られた衛星光学トラッキング装置が東京大学鹿児島宇宙空間観測所に設置された。

本稿は衛星光学トラッキング装置の要求性能と設計基準について述べる。カメラ装置には極軸を含めた4軸を有するシュミットシステムが採用され、衛星追尾にはセミオート制御が採用された。

1. 緒 言

科学衛星プロジェクトの一環として衛星光学トラッキング装置が東京大学鹿児島宇宙空間観測所に設置され、すでに“たんせい”、“しんせい”ならびに“でんぱ”科学衛星の光学観測を行い電波トラッキングシステムとの精度比較などが実施されている。本文ではこの光学トラッキング装置の要求性能ならびに設計基準について述べる。装置の詳細ならびに今までの観測結果については本号に別論文として発表されているので参照されたい (p. 439 および p. 450)。

なお本装置の開発に当っては宇宙研内に研究班を設け東京天文台関係者の大きな協力を得て行なわれたものである。

* 東京天文台

** 東京大学生産技術研究所

2. 人工衛星の光学追跡の特長

人工衛星の光学追跡は電波追跡とともにその軌道決定に必要なデータを提供するものである。特に電波送信機を搭載しない場合、電波が停止した場合にも追跡が行なえることが大きな特長である。

光学追跡は現在次の3方法が採用されている。

1. 眼視観測
2. 写真観測
3. レーザ観測

このうち、1は、小型望遠鏡を使って眼視的に衛星を観測するもので、衛星打ち上げの初期において、軌道決定、分離付属体の確認、変光の有無による衛星の形状、姿勢の確定、行方不明になった衛星の検出などに貢献している。観測可能範囲は、光度9等程度の衛星を 0.1° 程度の精度で観測できる。時刻精度は0.1秒程度である。

別の方法に大型のシネセオドライトによって次々と高度方位角を測定しながら衛星を追跡するものがある。この方法はシネセオドライトの性能によって異なるが角度精度30秒ぐらいが確保されている。

3の方法は約10年前から実施されているもので、逆反射器を搭載している人工衛星にパルス状のレーザ光線を送り、その往復時間の測定から衛星までの距離を決定するもので、現在測定精度1.5~0.2m、測定距離5,000kmに達している。しかもこの方法は白昼でも測定が可能である。

2の写真観測は光学追跡の主力をなすもので世界各国で独自に開発した追跡装置がある。特にアメリカのBaker-Nunnカメラ、ソ連のAFU 75カメラが質、量ともに群を抜き、それぞれ10数台を各地に配置している[1]。これによって衛星の軌道決定、軌道変化、地球形状の決定、観測地測地網の結合などに貢献している。

この方法の特長は同じ乾板上に写された恒星像を基準として用いるため角度測定精度が非常に高いことであって、適当な光学系を使用すれば1秒角以下の測定も不可能ではない。また、撮影された衛星像の明るさの変化から、衛星姿勢についての情報が得られる。

夜間の晴天時しか観測が行なえないことが大きな欠点である。

3. 要求性能

わが国の科学衛星の写真追跡に使用するカメラに要求される性能としては前述のBaker-Nunnカメラが参考になる[2]。このカメラはIGY計画によるバンガード衛星を追跡するために設計製作されたもので、わが国にも東京天文台堂平観測所にNo. 5号機があって衛星の国際協同観測に参加している。

バンガード計画の衛星は直径50cmの球形で平均高度1,000km程度の円軌道を想定していたので国産科学衛星の大きさと軌道の高さから見て、ほぼ同じ観測条件が期待される。したがってこのカメラはわが国の科学衛星の光学追跡が可能であって、事実“おおすみ”、“たんせい”、同第4段ロケットがこのカメラで撮影されている。したがって、このカメラを輸入すればよいことになるが、このカメラの仕様決定は約15年以前であって新しい技術の導

入が望まれる。また、東京天文台での長期間の使用経験から約20項目以上にのぼる要改良個所が指摘された。特に光学系の主要構成要素である補正レンズ用の光学ガラスの耐久性に大きな問題点があり、KSCのような海岸に近い場所での使用は不相当と考えられる。これらの改良には経費と納期の点でも無理が生じる。幸、検討の結果、次の様な要求性能ならば国産でも製作が可能であることが判った。

基本的な要求性能は Baker-Nunn カメラの性能と同等以上ということで出発した。

1. 光学系

人工衛星のように高速で運動する物体を撮影するカメラの能率 K は有効口径を D 、焦点距離を f とすると

$$K \propto D^2/f$$

となる。 D/f は所謂口径比 F の逆数であるから口径が大きく、 F が明るい必要がある。 f は原板上のスケールをきめるので、位置測定の精度を向上させるためには f を長くする。 σ を原板上 1 mm におけるスケール値とすると

$$\sigma' = 0.0002909 \times f \text{ (mm)}$$

となる。

座標測定機による原板上の衛星位置の測定精度は数 μ が期待されるので $1''$ 角を目標とするためには、 f を 500 mm 以上にしたい。

恒星を赤道儀追尾しながら撮影する時の極限等級 m_e は、経験上次式で計算できる。

$$m_e = 5.0 + 5 \times \log D + 2.5 \times p \times \log t$$

ただし D : 口径 (cm), p : 0.85, t : 露出時間 (分) である。

わが国の科学衛星の明るさは距離 4,000 km にて 10 等級と期待される。人工衛星の追尾精度は恒星の赤道儀追尾に比べると格段に困難である。ここで 10 倍の余裕をもたせ、また座標測定機による測定精度を向上させるために原板の極限等級よりさらに 2~3 倍程度濃い写真像を得たい。また露出時間は位置測定精度に大きく影響を与え、短時間露出が望ましい。

科学衛星の見かけ角速度は、 $2,000''/\text{sec} \sim 400''/\text{sec}$ 程度と期待され、その変化量は $60''/\text{sec}^2$ に達することがある。露出時間 t は数秒間以内にとどめる必要がある。以上を総合すると D は 400 mm 以上が必要であることがわかり、Baker-Nunn の口径 500 mm が妥当な線である。

次に撮影視界をきめる画角の問題がある。人工衛星の写真撮影はその軌道要素から将来位置を予想し、カメラの方向をきめて予定時刻にシャッターを開く方法をとる。衛星の将来位置の予報は可成り精度が悪いので、画角は充分大きくとりたい。ただし、位置予報のはずれは、衛星の平均運動がよく決まらないために生ずる衛星軌道上の真近点離角の予報の悪さが一番大きい。これは衛星の見かけの運動方向へのズレとして観測される、これと直角方向のズレは可成り小さいのが普通であるから、画角は長手方向が衛星の運動方向に合致させられるならば細長い形になっても差支えない。これは感光材料に長尺フィルムを使うことができる点で有利である。Baker-Nunn カメラの画角は $5^\circ \times 30^\circ$ である。

次に光学系の能率をよくするため、特に透過率に関係するので構成要素をなるべく単純にしたい。最近では電子計算機を使った光線追跡計算によって光学設計が楽になり収差の少ない

可成り複雑な光学系が設計可能である。しかし、大型のものとなると硝子材料、加工技術等の関係からも構成要素の単純化は好ましい。この様な性能を満足させる光学系としてはシュミット・カメラの右に出るものはない。

結局、科学衛星の写真追跡用の光学系としては以上の様な点から次の要求仕様を決定した。

- 口 径：400~500 mm
- 焦点距離：500~1,000 mm
- 写 野： $5^{\circ} \times 30^{\circ}$ 程度
- 形 式：シュミット・カメラ
- 測定精度：1秒角

2. カメラ系

シュミット・カメラの焦点面は球面となっているのでそのままでは乾板が使えない。乾板は位置測定の精度の点でフィルムより優れている。焦点面直前に平坦化レンズを挿入することによって光学系の性能は多少犠牲になるが乾板が使用できる。しかし人工衛星のように次々と可成短時間に連続的に撮影を繰り返すためには、乾板の迅速交換機構に問題がある。長尺フィルムはその点便利である。特に最近はフィルムベースにエステルを使用しているため伸縮による精度の悪化の問題は全く解決している。残る問題点はフィルムの平面性である。フィルムゲート、圧着板等機械的な配慮によってこれを極力少なくすることができよう。

採用フィルムとしては市販品と同一サイズにするべきである。35, 55, 70 mm が入手が容易であって、画角を大きくするためには70 mm 幅を採用したい。Baker-Nunn は55 mm である。フィルム送り機構の確実性からパーホレーション付きが望ましい。

シャッター機構は数種類の露出時間が選択可能とする。衛星の明るさによって適宜使用する。

露出時刻の精密な記録のためにチョッパー機構が必要である。Baker-Nunn においては1露出時間中に5チョップしながら時刻記録は中央の1回しか行っていない。全チョップの時刻を記録して測定精度の向上に勉めたい。

また Baker-Nunn は、シャッター、チョッパー、フィルム送り等をカメラモーターと称する。単一モーターで行なっているため、回転ムラが生じている。独立したモーターを使用したい。

露出間隔は GEOS・A, B 等の発光衛星の撮影が可能のように2, 4, 8, 16 秒としたい。人工衛星の国際的な協同観測に参加することが可能である。

チョップ時刻の検出は Baker-Nunn は機械接点であるが新しい無接点センサー等を採用したい。

焦点合せ機構は Baker-Nunn の例にならった3本のインバー棒による温度補償機構が不可欠である。

3. 架 台 部

方位・高度軸の他に追尾軸を設けた Baker-Nunn は高速に運動する物体を追尾するために非常に便利である。特に写真観測では写野の回転が生じて困るので X-Y マウントは使えな

い。

細長い画角を使った場合に衛星進行方向に長手方向を一致させるためにも3軸方式は不可欠のものである。

衛星が5等級より明るくなるとカメラは固定して衛星を追尾しなくとも十分に撮影可能となる。

この場合恒星は日周運動によって短かい線状に流れるので位置測定精度が低下する。Baker-Nunn の大きな欠点の一つである。

そのため、日周運動を追尾する赤道儀機構を是非加える必要がある。赤道儀機構としては地球自転軸に平行な極軸を設ける。ただし極軸の使用範囲はごく小さく ± 3 度程度以内でもよい。

以上のように方位、高度、追尾、極と4軸を設ける必要がある。各軸は電動駆動でしかも数値制御装置をつけることが望ましい。

各軸の角度指示はデジタルで 0.01° を表示する。絶体値読み出しは要求せず、原点リセット可能なインクリメンタルな読み出し機構を設ける。

追尾軸の速度範囲は $100''/\text{sec} \sim 2,000''/\text{sec}$ とする。各軸の位置決め速度は $90^\circ/\text{分}$ 程度とし、追尾・高度軸の指向範囲は天頂より ± 70 度、方位軸は北を中心に ± 200 度以上としたい。

4. 制御部

オペレーションの省力化のために手動の他にプログラム制御が可能としたい。

プログラム命令の入力方式は紙テープとし各軸の設定、追尾軸の速度、撮影開始時刻などを指定することができる。

撮影コマ数、露出時間およびその間隔などは別に制御盤に設定する。手動操作はカメラの近くでコントロール箱により行なう。

時刻表示は $1 \mu\text{sec}$ とし $10 \mu\text{sec}$ までが撮影フィルムの一部に記録される。時刻規準は観測所内の標準時計より1 MHz 信号を供給する。

4. 結 言

以上が光学追跡に必要なカメラの要求性能の主な点である。

東京大学鹿児島宇宙空間観測所にこの装置が設置されると東京天文台堂平観測所に現有のBaker-Nunn カメラと組んで、わが国の衛星光学追跡の拠点となり日本の基準点として重要な位置をしめることになる。特に衛星測地観測における基地点としての機能を発揮できるようになれば、わが国とその近傍における測地学にも大いに貢献しよう。また有力な天文観測機械の一つとして天体物理観測、位置天文観測にも大いに利用できよう。

1974年5月30日 新設部 (工学)

参 考 文 献

- [1] A. G. Massevitch: Space Reserch 2 (1961)
- [2] A. G. Massevitch: Space Science Reviews Vol. 11, No. 2/3 (1970)

- [3] Cospas Information Bulletin No. 25, Oct. 1965
- [4] K. G. Henize: *Sky and Telescope* **16**, 1957
- [5] 富田弘一郎: *天文月報*, **65**, No. 9, 1972
- [6] 齊藤成文, 富田弘一郎: *位置天文学シンポ研究集録*, 1971
- [7] 平山智啓: *位置天文学シンポ研究集録*, 1971