

スター・フォロワの開発*

田 中 済†

概 要

気球用スター・フォロワ（口径8 cm）を試作し、地上テストを行なった結果、3等星までが1'以下の誤差でフォローできることが確かめられた。

1. 開発の目的

われわれは数年来、気球からサン・フロワを使った太陽の観測を行なってきたが、近年その追尾精度は10''程度までに向上した。一方、夜間の観測でも星を追尾する必要性が高まっており、特にストラトスコープのような気球望遠鏡の開発にはぜひともスター・フォロワが必要である。

2. スター・フォロワの原理

今回開発したスター・フォロワは赤道儀式で、磁気センサを使った“よりもどし規正”[1]によって方位が $\pm 1^\circ$ 程度まで規正された Gondola の上で作動することを前提としている。赤道儀式とした理由は、2軸で3軸規正と同じ効果がえられること、目的の天体を捜しやすいことである。赤経・赤緯軸にポテンシオメータをとりつけ、出力をテレメータすれば、望

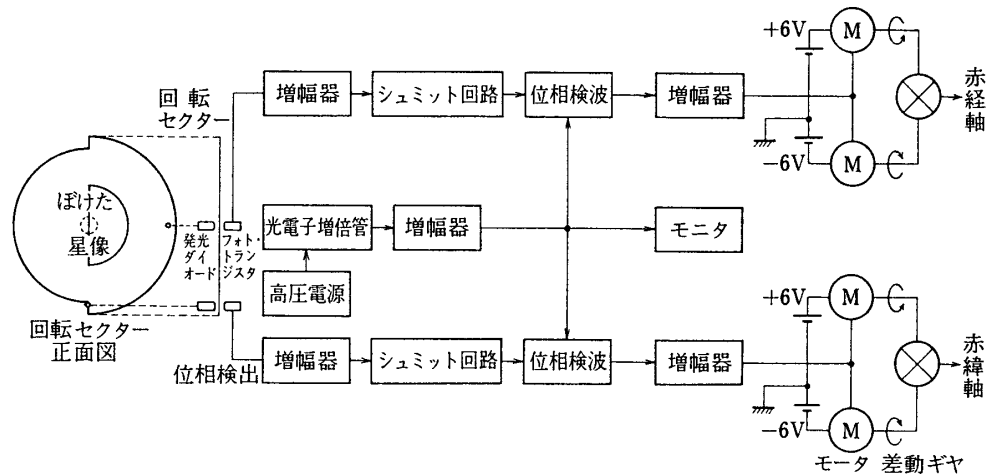


図1 スター・フォロワ・ブロック・ダイアグラム

* 宇宙研特別事業費による研究論文

† 東京大学理学部

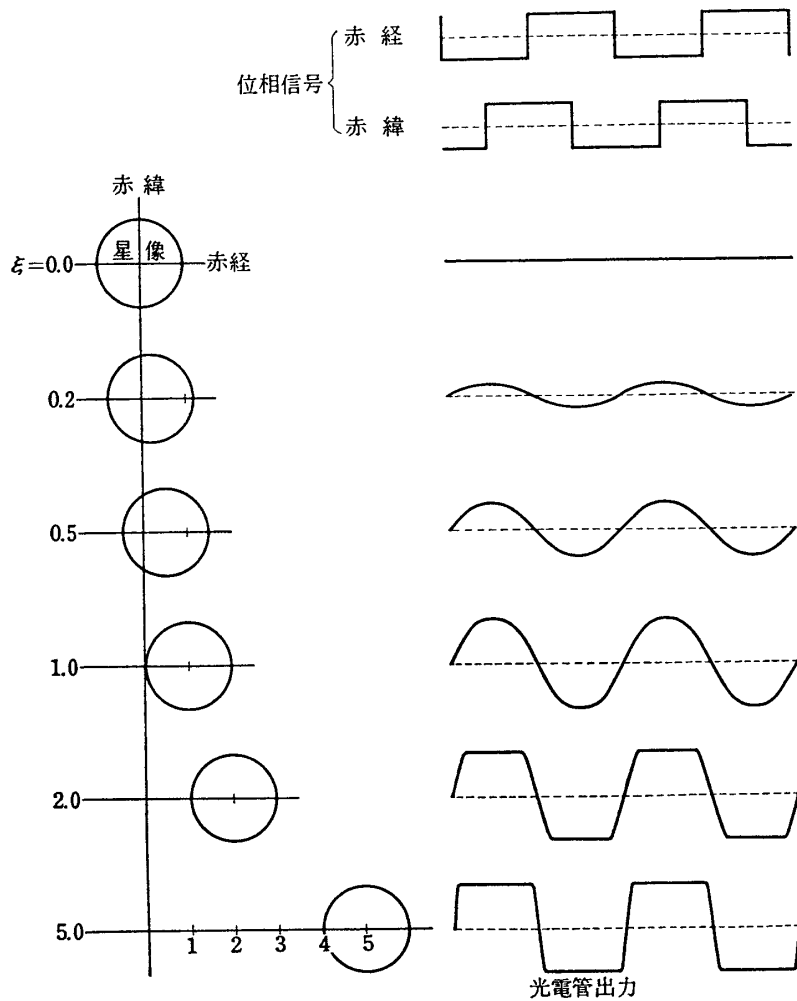


図2 光電子増倍管出力波形

遠鏡の向いている方向の赤経（時角）と赤緯がわかる。地上からのコマンドで望遠鏡の赤経・赤緯を合わせると、よりもどし規正の誤差以内で目的の天体が入ってくる。

望遠鏡の焦点から少しはずれたところに半月形の孔をあけた回転セクタをおくと、望遠鏡で作られたピンボケの星像の位置によって回転セクタを通過する光量に変化する。これを光電子増倍管で測り、位相検出器の信号にあわせて位相検波し、赤経と赤緯のずれの成分を分離する（図1）。

図2は星像の回転セクタ中心からのずれによる出力波形の変化を示したもので、ずれをぼけた星像の半径を単位としてξであらわしてある。

ξ ≤ 1 では回転セクタの位相をφであらわすと光電管出力波形の交流成分は

$$I(\varphi) = I_0 \frac{2}{\pi} \{ \sin^{-1}(\xi \sin \varphi) + \xi \sin \varphi \sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \varphi} \}$$

のような形となる。ξ = 0 では交流成分はあらわれないが、ξ → 0 では

$$I(\varphi) \rightarrow I_0 \times \frac{4}{\pi} \xi \sin \varphi$$

であって、波形は正弦波に近くなる。また $\xi=1$ (つまり星像半径だけずれた) のときには

$$I(\varphi) = I_0 \times \frac{2}{\pi} \left(\varphi + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right)$$

のような波形となる。

$\xi > 1$ では波形は ξ の増大とともに矩形波に近づくが、実際には回転セクタの大きさに視野が制限されるため、計算通りにはならない。

次にこの交流波形を位相検波した結果を考える。今、簡単のために赤経の方向のみにずれている場合を考えると、赤緯成分は位相検波の結果 $+$ と $-$ が相殺して出力は 0 になる。赤経成分は

$$V(\xi) = \frac{V_0}{I_0} \times \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} I(\varphi) d\varphi$$

であらわされるような検波出力がえられる。 $\xi \rightarrow 0$ では

$$V(\xi) \rightarrow V_0 \times \frac{8}{\pi^2} \int_0^{2/\pi} \sin \varphi d\varphi = V_0 \times \frac{8}{\pi^2} \xi = 0.81057 V_0 \xi$$

であり、 $\xi=1$ では

$$V(\xi) = V_0 \times \frac{4}{\pi^2} \int_0^{\pi} \left(\varphi + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right) d\varphi = V_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi^2} \right) = 0.70264 V_0$$

である。 ξ が大きいときは漸近的に V_0 に近づくが、その漸化式は

$$V(\xi) \rightarrow V_0 \left(1 - \frac{1}{\pi \xi} \right)$$

であらわされる。

図 3 はこれらの様子を図示したものである。 V_0 としては 6 V を採用してある。ずれが小さいときは、検波出力がずれの量に比例し、ずれが大きいときは $\pm V_0$ となることがわかる。この電圧をモータに加えてずれが 0 になるようにコントロールするわけであるが、赤経・赤緯軸の回転速度 ω が V に比例するとした場合、運動方程式は

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = -k_1 V$$

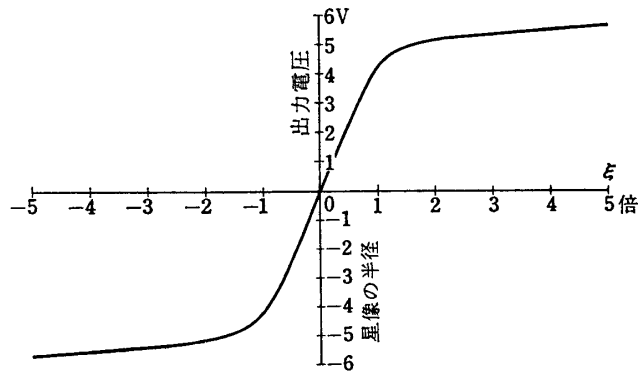


図 3 星像のずれに対する出力電圧

となる。ただし、 $k_1 > 0$ の定数とする。 θ はずれの量であって、 $\theta = k_2 \xi$ とあらわせるものとする。 ξ が小さいときは V と ξ が比例することを考慮して、結局方程式は

$$\frac{d\theta}{dt} = -k\theta$$

となり、

$$-t + \text{const.} = \frac{1}{k} \log_e \theta$$

あるいは

$$\theta = \theta_0 e^{-kt}$$

となることがわかる。

これまでの議論はアンプやモータは時定数をもたないものとして行なってきた。実際には回転セクタの回転数が有限であるため (50 Hz が限度)、検波回路の時定数はかなり大きくとらなければならない。上式の $1/k$ はこのサーボ系の理論的な時定数であるが、これがアンプやモータの時定数より小さいと不安定になってしまう。サーボ系が安定なためには $1/k$ をアンプなどの時定数の少なくとも3倍、できれば10倍程度にえらぶ必要がある。一方 $1/k$ が大きくなるとフォロワのレスポンスが遅くなって、追尾精度が落ちてしまう。“よりもどし規正”の時定数は気球の回転とのかねあいで30秒～1分程度にえらばれるので、 $1/k$ はこれより1けた小さい3～6秒にえらべば問題はない。アンプなどの時定数はさらに1けた小さい0.3～0.6秒とすると、回転セクタの回転数である50 Hzとはまだ2けた程度の余裕があることになる。

k は赤経・赤緯軸とモータの間のギヤ比や星像のぼかし程度に関連してきまる値であって、軸の回転角速度を $V = V_0$ の場合、 $30'/\text{sec}$ (1回転12分) とすると、

$$k = 0.81057 \times 30' \times \frac{1}{k_2} \text{ sec}^{-1}.$$

k_2 は星像の角半径であって、前記のように $1/k = 1$ 秒とするためには、 $k_2 = 24'$ と計算される。実際には $k_2 = 5'$ としたから、 $1/k = 0.2$ 秒となる。アンプの時定数は30 msにえらんであるので、サーボ系としては安定である。

3. 装置の概要

今回試作したフォロワは8 cm 屈折赤道儀 (焦点距離 120 cm) を改造したもので、回転セクタと光電子増倍管からなる受光部と位相検波を行なう増幅器、差動モータを使った駆動部からなる。

回転セクタは50 Hzで回転し、そこにあけられ

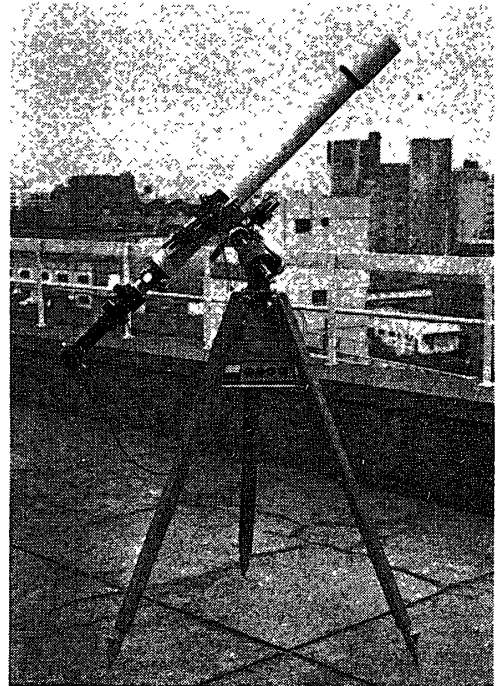


図4 試作したスター・フォロワー

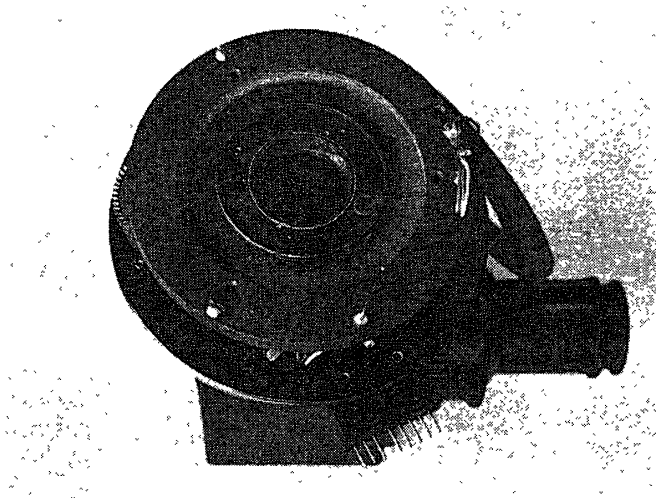


図 5 回転セクター

た半月形の孔の半径は 9 mm (角度 25' に相当) である。セクターの直後にはフェブリ・レンズがあって対物レンズの像が光電子増倍管 (EMI 6256 B) の光電面に作られる。セクターの周囲には発光ダイオードとフォト・トランジスタを使った位相検出器が 90° はなれてとりつけられている。セクターには半月形の孔と反対側に半周にわたって切り込みがあり、ここで発光ダイオードの光をさえぎって位相信号を出す。

光電管の出力電流は μA 以下なので、これを高入力インピーダンスのオペレーショナル・アンプで受け、電圧に変換する。このとき交流成分のみを増幅し、直流成分はカットする。星の等級に応じて利得を変えるためのアテネッタを通ったあと同期検波され、ブースタ付きの差動アンプで低インピーダンス出力がとり出される。出力電圧は $\pm 6\text{V}$ である。スター・フォロワの作動をチェックするため、交流成分の大きさを電圧計で読んでモニターする。

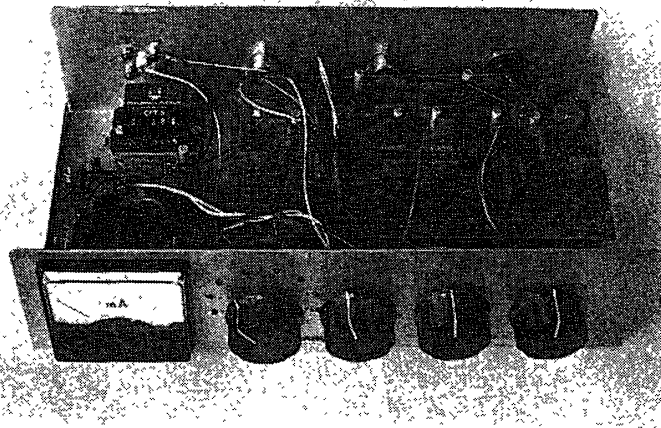


図 6 増幅器

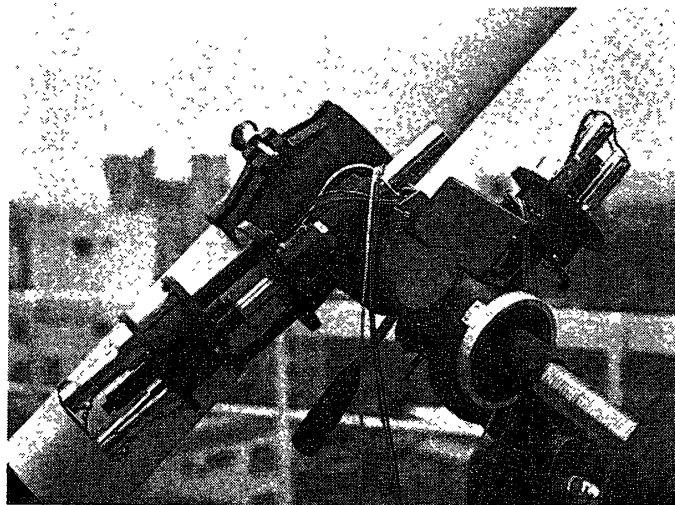


図7 駆動部

駆動用のマイクロ・モータは各軸2個が差動ギヤを介してとりつけられている。モータは電氣的に直列に接続され、 $\pm 6V$ のバイアスがかかって逆向きに回転している。モータ中心の電圧が $0V$ のときは回転がバランスして軸は回転しない。 $0V$ からのずれに応じて回転数や方向が変わり、バランス状態になるようにサーボ機構が働らく。モータが差動方式のため、1モータ式のように $0V$ 付近の不感帯がなく、直線性はきわめてよい。この方式はサン・フォロワにも以前から使用して好成績をおさめている。

4. 実験結果

実験は東大天文学教室の屋上で行なった。衆知のごとく東京の空は明るく、受光部の視野が 1° 近くもあるため、その光度は-1等星に匹敵する。本装置は光電管出力のうち交流成分のみを使っているので問題はないはずであるが、3~4等星では星にくらべて空が100倍も明るいため出力が不安定になり、フォローがむずかしくなった。1等星ではなんら支障なく完全な追尾が行なわれ、規正誤差は $1'$ 以内に入ることが確かめられた。

星像のぼかしぐあいはサーボ系の時定数に関係してくるので、望遠鏡の焦点調節機構を使って変化させてみたが、あまり星像が小さいと不安定になり、大きすぎるとレスポンスが悪くなるので、星像の半径 $5' \sim 10'$ というのが適当のようである。

試作したフォローは既成品を加工したため、ギヤ比など適正でなく、筒が長いため風などの影響を受けやすい。早い機会に始めからフォロー用に設計したものを上空にあげてテストしてみたい。上空では空も暗いし、風もないからある面では条件がよくなると考えられる。またこの方式は地上でも望遠鏡の自動ガイド装置としての応用が考えられる。

稿を終えるにあたって、本装置の設計・製作を担当された中村勝重さんをはじめとする三鷹光器の方々にお礼を申しあげる。

1973年1月31日

参 考 文 献

- [1] 西村 純, 広沢春任, 太田茂雄, 大塚 豊, 奈良禧徳: 宇宙研報告, 5, 132, 1969 および 6, 249, 1970