

気球搭載望遠鏡の仰角制御*

矢島信之**・小鍛治 繁**・橋野 賢**

1. はじめに

気球に搭載した望遠鏡による天体観測では、制御技術によって、太陽や星を連続的に精度よく追尾する必要がある。高精度の追尾を実現するためには、感度が高くかつノイズの少ないガイド用センサやバックラッシュとか摩擦などの少ない精密な駆動機構が必要となることは言うまでもないが、制御系それ自体が安定で応答の速い特性を有していなければならないすなわち、フィードバック制御によって追尾精度を高めるためには、僅かな偏差が生じて、その量が大きく増幅され強い修正動作が行われた方がよいわけである。しかし多くの場合、単に制御回路のゲインを増大させてゆくと、修正動作が過剰となりかつ目標の変動と位相が合わなくなってしまう、制御系の応答のダンピングは悪化し、ついには発振を起し制御不能となる。したがって、ゲインを高くしても不安定とならないように制御系を設計し制御精度を向上させることが、制御技術にとっての重要な課題となる。

気球搭載望遠鏡は、地上のそれとは異なり、気球からつりひもで懸下された足場の定かでない状態にある。したがって安定な制御には特有の問題がある。たとえば、写真1は、現在我々が開発を進めている口径30 cmの気球搭載望遠鏡の制御システムであって、仰角の制御はゴンドラを足場として鏡筒を動かしている。小型ないし中型の望遠鏡ではこうした方式が採用されることが多いが、鏡筒をモータで駆動すれば、その反作用で足場となっているゴンドラは逆方向に力を受け、振子運動が発生する。この動きは仰角の制御を不安定にする要因となり精密な制御を阻害する。しかも望遠鏡が大きくなり、鏡筒の慣性モーメントがゴンドラのそれに近づくにつれて不安定化の傾向は促進される。

本論は、この望遠鏡の仰角制御において不安定要因となるゴンドラの振子運動を解析するとともに、制御回路に補償回路を挿入することで制御動作を安定化させる方策を検討することを目的としている。

2. ゴンドラの運動モデル

気球よりつりひもで懸下されたゴンドラは、気球を固定点とすれば、第1図に示すように典型的な2重振子となる。気球自体をも剛体として扱い、その動きも含めた解析はすでに試みられているので[1]、その結果を取り入れてもよいが、ここで考察の対象とする望遠鏡の

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 機械技術研究所

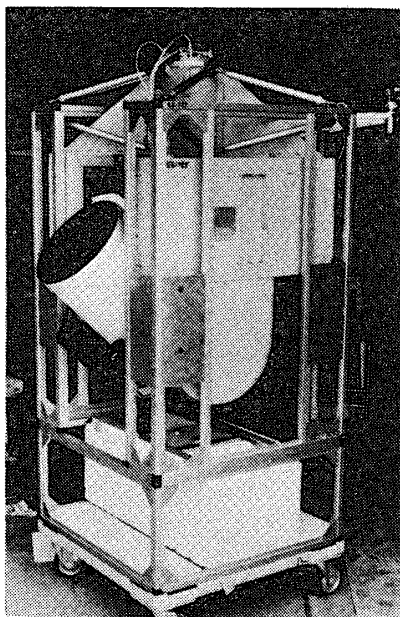
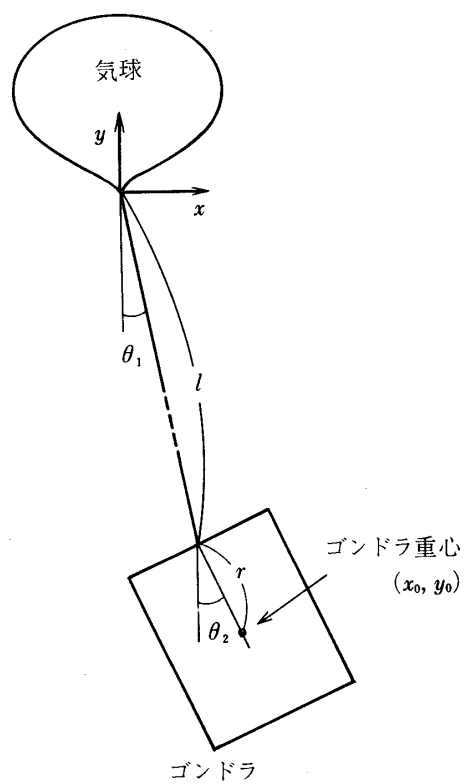


写真1 気球搭載望遠鏡システムの一例



第1図 気球より懸下されたゴンドラのモデル

運動にとってはさほど大きな影響はなく、扱いを複雑にするだけであると思われるので省略する。また、振子運動は空気抵抗やつりひものねじれによる発熱などで減衰するが、いずれもその量を正確に把握することは困難であり、かつ量としても僅かであるのでこれも無視する。そうした自然減衰によらなくても振子運動を減衰させ、安定に制御する方法を考えるのが本論の主題である。

こうした仮定のもとに第1図のモデルの解析を行う。座標系は空間に固定された絶対座標とし、原点を気球の下端におく。したがって、ゴンドラの重心位置 (x_0, y_0) は

$$x_0 = l \sin \theta_1 + r \sin \theta_2 \quad (1)$$

$$y_0 = -l \cos \theta_1 - r \cos \theta_2 \quad (2)$$

であり、この系の運動エネルギー項 T は、

$$\begin{aligned} T &= \frac{M}{2} (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2) + \frac{1}{2} I_G \dot{\theta}_2^2 \\ &= \frac{M}{2} (l^2 \dot{\theta}_1^2 + 2 \cos(\theta_1 - \theta_2) l r \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + r^2 \dot{\theta}_2^2) + \frac{1}{2} I_G \dot{\theta}_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

となる。またポテンシャル項 U は

$$U = Mg \{ l(1 - \cos \theta_1) + r(1 - \cos \theta_2) \} \quad (4)$$

である。ここで、

θ_1 : 気球つりひもの傾角

θ_2 : ゴンドラの傾角

I_G : ゴンドラの重心回りの慣性モーメント

M : ゴンドラの質量

l : 気球つりひもの長さ

r : ゴンドラの上端から重心までの距離

である。ラグランジェの方程式 $L = T - U$ として

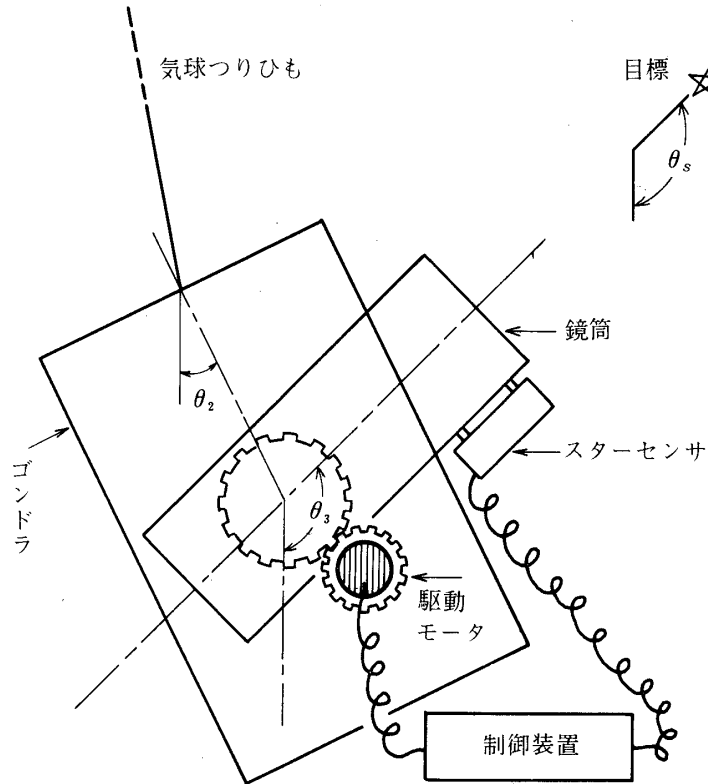
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = 0 \quad (5)$$

より運動方程式を求める。振子運動の振幅は小さく $\theta_1 \ll 1$, $\theta_2 \ll 1$ として近似し、外力を零とすれば、

$$\ddot{\theta}_1 + \omega_1^2 \theta_1 + K \ddot{\theta}_2 = 0 \quad (6)$$

$$\left(1 + \frac{I_G}{M r^2} \right) \ddot{\theta}_2 + \omega_2^2 \theta_2 + \frac{1}{k} \ddot{\theta}_1 = 0 \quad (7)$$

が得られる。ここで $\omega_1^2 = g/l$, $\omega_2^2 = g/r$, $k = r/l$ である。



第2図 ゴンドラ内部での鏡筒の仰角制御

(6), (7)式で表わせるような2重振子運動を行うゴンドラの内部で, 第2図に示すような鏡筒の仰角制御を行う. スターセンサは, 目標の星の仰角 θ_s と望遠鏡の仰角 θ_3 との差 $\theta_e = \theta_s - \theta_3$ を検出し, θ_e に比例した電圧出力を発生する. この出力信号は制御回路内の補償回路で信号変換され, さらに増幅されて仰角制御用モータを駆動する. 制御モータが発生するトルク T_M によって鏡筒が動かされるとともに, 反作用としてゴンドラも外力 $-T_M$ を受けて動く. したがって (7) 式にこの外力を加えて

$$\left(1 + \frac{I_G}{Mr^2}\right)\ddot{\theta}_2 + \omega_2^2\theta_2 + \frac{1}{k}\ddot{\theta}_1 = -\frac{T_M}{Mr^2} \quad (7')$$

となる. また鏡筒の動きは,

$$I_T\ddot{\theta}_3 + \frac{nK_fK_T}{R}(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) = K_c \frac{nK_T}{R} g_c(\theta_e, \dot{\theta}_e \dots) \quad (8)$$

$$T_M = I_T\ddot{\theta}_3 \quad (9)$$

で表わせる. ここで

I_T : 鏡筒の慣性モーメント
 K_T : 駆動モータの電流トルク定数
 K_f : 駆動モータの逆起電力定数
 n : 駆動モータ減速比
 $g_c(\theta_e, \dot{\theta}_e \dots)$: 補償回路の特性
 K_c : 制御系のゲイン

である.

(6), (7), (8), (9) 式をラプラス変換すれば

$$\Theta_1(s)s^2 + \omega_1^2\Theta_1(s) + k\Theta_2(s)s^2 = 0 \quad (10)$$

$$\left(1 + \frac{I_G}{Mr^2}\right)\Theta_2(s)s^2 + \omega_2^2\Theta_2(s) + \frac{1}{k}\Theta_1(s)s^2 = -\frac{T_M(s)}{Mr^2} \quad (11)$$

$$I_T\Theta_3(s)s^2 + \frac{nK_fK_T}{R}\{\Theta_3(s) - \Theta_2(s)\}s = K_c\frac{nK_T}{R}G_c(s)\Theta_e(s) \quad (12)$$

$$T_M(s) = I_T\Theta_3(s)s^2 \quad (13)$$

(s : ラプラス演算子)

となる. (10), (11) 式より外力 $T_M(s)$ とゴンドラの振れ角 $\Theta_2(s)$ の関係を示す伝達関数を求めれば

$$\frac{\Theta_2(s)}{T_M(s)} = \frac{s^2 + \omega_1^2}{I_Gs^4 + \{(\omega_1^2 + \omega_2^2)Mr^2 + I_G\omega_1^2\}s^2 + Mr^2\omega_1^2\omega_2^2} \quad (14)$$

となる. ゴンドラの振子運動周期は, (14) 式の右辺の分母を 0 とする s の根として求まるが, 分母の式は,

$$\begin{aligned}
 &I_Gs^4 + \{(Mr^2 + I_G)\omega_1^2 + Mr^2\omega_2^2\}s^2 + Mr^2\omega_1^2\omega_2^2 \\
 &= (I_Gs^2 + Mr^2\omega_2^2)(s^2 + \omega_1^2) + kMrgs^2
 \end{aligned} \quad (15)$$

と変形される. ここでつりひもはゴンドラの高さに比べて十分長く $l \gg r$ であるとすれば, $k = r/l$ は十分小さい. したがって, ゴンドラの振子運動は, 2つの周期

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (16)$$

$$T_2 = \frac{2\pi}{r\omega_2\sqrt{\frac{I_G}{M}}} = 2\pi\sqrt{\frac{I_G}{Mr g}} \quad (17)$$

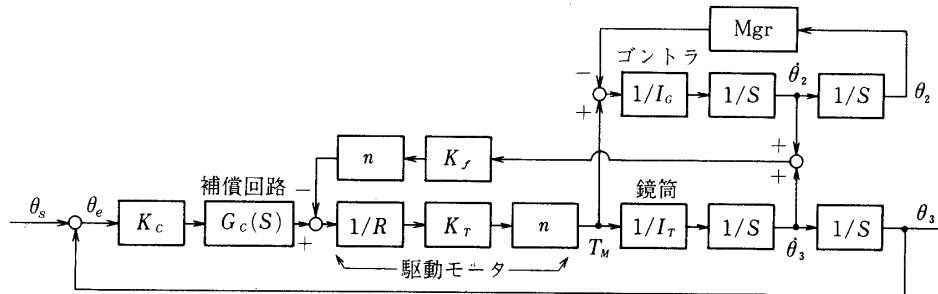
から若干ずれたものの合成となる. T_1 は明らかにゴンドラを質点とした場合につりひもの長さで定まる振子運動の周期である. 他方 T_2 はゴンドラが剛体であるために生ずる短周期の振動である. これにたいし, ゴンドラの上端を回転中心とする, いわゆる物理振子の周期は,

$$T_2' = 2\pi \sqrt{\frac{I_G + Mr^2}{Mr g}} \quad (18)$$

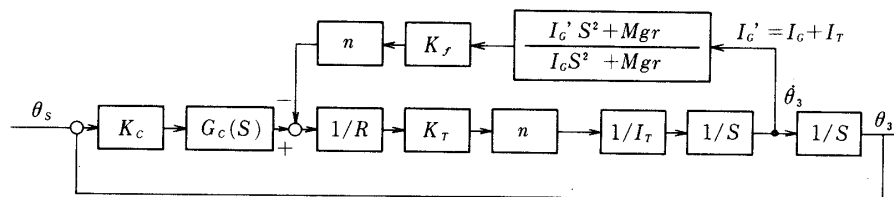
であるから, $T_2' > T_2$ となり, つりひもが長くなるにつれ振動は早くなってしまい, 制御にとっては望ましくない方向に作用していることがわかる.

l が十分大きいとして $k=r/l$ と $\omega_1^2=g/l$ を 0 として扱い, (12), (13), (14) 式より仰角制御系のブロック図を画くと第3図となる. 駆動モータより発生するトルクによって, 慣性モーメント I_G のゴンドラと慣性モーメント I_T の鏡筒が動き, その結果駆動モータには逆起電力による自己帰還がかかるが, モータの回転数はゴンドラと鏡筒の相対的動きであるから, $(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)$ に比例した量が速度帰還となる. この速度帰還ループを解析に便利のように整理すると第4図となる. このループに加わっている伝達関数 $G_f(s)$

$$G_f(s) = \frac{I_G' s^2 + Mr^2 \omega_2^2}{I_G s^2 + Mr^2 \omega_2^2} \quad (19)$$



第3図 仰角制御系のブロック図



第4図 仰角制御系のブロック図 (第3図の速度帰還ループを単純化)

は振子運動によって制御系が影響を受けているために存在するものである。ここで $I'_G = I_G + I_T$ であるから、もし $I_G \rightarrow \infty$ または $I_T \rightarrow 0$ であれば $G_f(s) = 1$ となり、地上の望遠鏡を駆動することと同じになる。しかし実際問題として、鏡筒の慣性モーメントが無視できるほどゴンドラのそれを大きくすることはできないので、気球に搭載する望遠鏡では $G_f(s)$ の影響を無視するわけにはゆかない。

3. 安定性の解析と補償回路

ここでは、第3図に示す制御系の安定性の解析を行い、不安定となる場合には安定させるために必要な補償回路の特性を考える。解析を行う手段として、根軌跡法を用いる。この手法は、第5図のような一般的なフィードバック制御系において、制御ループ内の伝達関数 $G(s)$ が、

$$G(s) = \frac{\prod_{j=1}^m (s + z_j)}{\prod_{i=1}^n (s + p_i)} \quad (n > m) \quad (20)$$

と記述できる場合に、 $(-p_i)$ を極、 $(-z_j)$ を零点と呼ぶ)

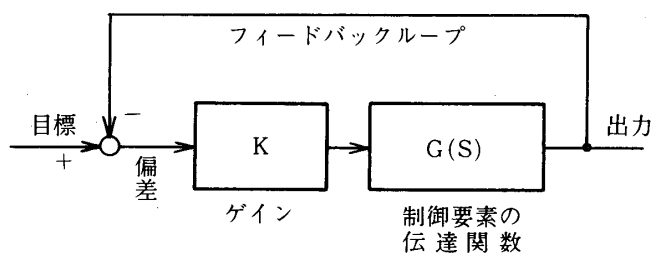
$$\prod_{i=1}^n (s + p_i) + K \prod_{j=1}^m (s + z_j) = 0 \quad (21)$$

(K : 制御系のゲイン)

なる n 次方程式の根 $-p'_i$ を、ゲイン K をパラメータとして求め、その根の軌跡を複素平面上に画くことにより、制御系の応答特性を求める方法である。なぜならば、第5図に示す制御系の入力と出力の間の伝達関数(閉ループ伝達関数) $G_c(s)$ は

$$G_c(s) = \frac{\prod_{j=1}^m (s + z_j)}{\prod_{i=1}^n (s + p_i) + K \prod_{j=1}^m (s + z_j)} \quad (22)$$

となるが、(21) 式の根 $-p'_i$ が求まるならば、



第5図 一般的なフィードバック制御系

$$G_c(s) = \frac{\prod_{j=1}^m (s + z_j)}{\prod_{i=1}^n (s + p'_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{(s + p'_i)} \quad (23)$$

(A_i : 定数)

と部分分数展開ができる。そして逆うプラス変換による過渡応答の算出は、

$$L^{-1}\{G_c(s)\} = \sum_{i=1}^n A_i e^{-p'_i t} \quad (24)$$

として求めることができる。もし根 $-p'_i$ の実部が正であれば(根軌跡が複素平面の右半面に入れば), 応答は時間とともに増大するので不安定な制御となる。したがって, 複素平面上の $-p'_i$ の位置により制御が安定か否か, また過渡応答がどのようなものであるかを知ることができる。本来の根軌跡法は, 根の位置を複素平面上で試行錯誤的に描いてゆく手法であるが, ここでは, 我々が開発したアルゴリズムによって電子計算機で自動的に画かせるとともに, その値をもとにステップ応答と周波数応答も計算し, 表示させている[2]。

計算機プログラムは会話型として作られており, グラフィックディスプレイに表示される根軌跡やステップ応答波形を見ながら, 補償回路などのパラメータを変更し, その効果をす早く確認することができる。

3.1 仰角制御系の根軌跡

第一段階として, 安定化のための補償回路を加えていない場合, すなわち第3図で $G_c(s) = 1$ の場合の制御系の安定性を調べる。まず, 第3図のブロック図において速度帰還ループ部分の閉ループ伝達関数を根軌跡で求める。一巡伝達関数 $G_0(s)$ は

$$G_0(s) = \frac{n^2 K_T K_f}{R I_T} \cdot \frac{(I'_G s^2 + Mrg)}{s(I_G s^2 + Mrg)} \quad (26)$$

であるから, 極は

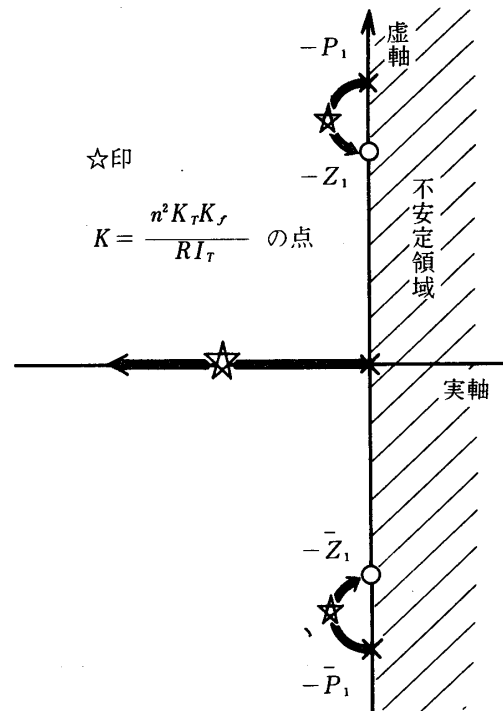
$$-p_1, -\bar{p}_1 = \pm j \sqrt{\frac{Mrg}{I_G}}$$

$$-p_2 = 0$$

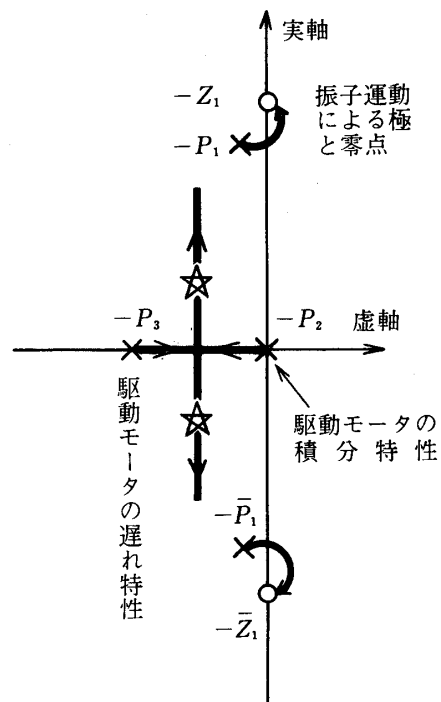
であり, 零点は

$$-z_1, -\bar{z}_1 = \pm j \sqrt{\frac{Mrg}{I'_G}}$$

である。 $I'_G > I_G$ であるから $|p_1| > |z_1|$ となり極と零点の配置および根軌跡は第6図のようになる。一巡ゲイン, $n^2 K_T K_f / R \cdot I_T$ に対応する☆印の位置がマイナーループの極となり, 零点はこのフィードバックループ内の伝達関数の極, すなわち $-p_1, -\bar{p}_1$ が新しい零点と



第6図 速度帰還ループの根軌跡



第7図 仰角制御系の根軌跡

なる。

上記の結果をもとに、制御系全体の極、零点の配置と根軌跡を画くと第7図となる。この根軌跡は通常のサーボモータによる制御系に虚軸上の極と零点のペアが加わったものとなっている。この極と零点のペア一部分の軌跡に注目すると、同図右上に示すように、ゲインが増大するとともに軌跡は複素平面上の右半面に入り込み不安定となってしまう。すぐ近傍に零点があるため、不安定とはいえ振幅は急速に増大しないが、確実に発散してゆく。もちろん、ゲインを小さくし、軌跡が右半面に入らない点で制御すれば安定である。しかし、それでは制御系全体としてゲインが小さすぎ、十分な制御特性は得られない。振子運動以外に、この制御系の応答に支配的な影響をおよぼすのは、第7図の根軌跡の中で、 $-p_2$ 、 $-p_3$ から出発している軌跡である。ゲインが小さい場合、根はこの軌跡上の適切な位置になく、応答の遅い制御となってしまう。

3.2 補償回路による安定化

仰角制御系に何ら補償回路を加えず、目標との位置偏差信号を増幅して制御モータを駆動するだけでは、安定な制御が望めないことが明らかとなった。そこで第3図のブロック図の中にある補償回路 $G_c(s)$ に、ある特性を持たせ、制御系を安定化する必要がある。通常の補償回路としては、応答を早めたり、制御偏差を減少させるために、よく知られている位相進め補償や遅れ補償あるいは積分補償等を用いる。実際の仰角制御にあってもそうした補償回路を導入するが、ここでは振子運動にともなう不安定さを除くための補償回路のみについて考察する。

補償回路は、それを挿入したことで振子運動を抑制するように作用しても、他の応答特性に影響を及ぼさないことが望ましい。すなわち、虚軸付近にある根軌跡には影響を及ぼすが、他の軌跡には変化が生じない補償回路が必要である。最も簡明な補償回路は、第7図の根軌跡における $-p_1$ 、 $-z_1$ 、 $-\bar{p}_1$ 、 $-\bar{z}_1$ と全く反対の特性、すなわち極と零点を逆にした補償回路である。そうすれば、各々打ち消し合う相殺補償となって、振子運動による極と零点は消えて安定化し、かつ他の軌跡にはほとんど影響がない。

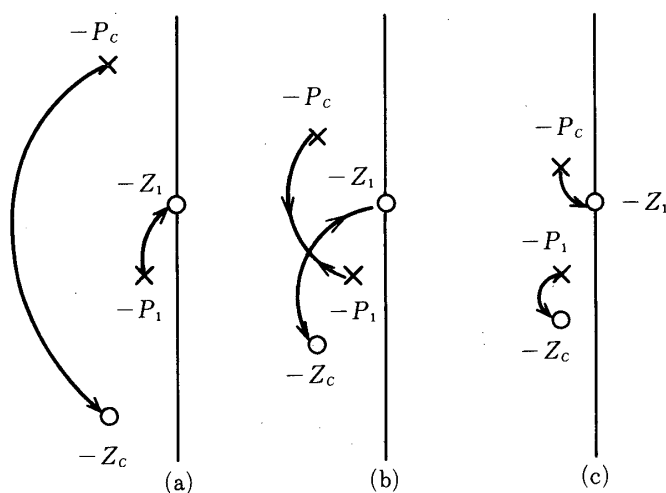
ただし、実際問題として、フライト状態での振子運動周期を地上テストで正確に知り、それを相殺することは困難である。補償回路は、振子運動周期が多少ずれても効果を発揮する必要がある。そこで第8図に示すように、振子運動による極 $-p_1$ 、零点 $-z_1$ を挟むように補償回路の極と零点 $-p_c$ 、 $-z_c$ を配置すると、根軌跡は新たに加わった $-p_c$ と $-z_c$ の影響で進行方向を変え、安定な右半面を通るようになる。他の軌跡上から見て、 $-p_c$ と $-z_c$ が十分に接近していれば、その軌跡への影響はほとんどない。第8図に (a), (b), (c) と3つの図を画き、 $-p_1$ 、 $-z_1$ にたいして、補償回路 $-p_c$ 、 $-z_c$ の位置が多少異なったとしても、根軌跡は、いずれも複素平面の左半面にあることを示している。すなわち、振子運動の周期の見積りに多少の誤差があっても補償回路は有効である。

補償回路の伝達関数 $G_c(s)$ は

$$G_c(s) = \frac{(s + z_c)(s + \bar{z}_c)}{(s + p_c)(s + \bar{p}_c)}$$

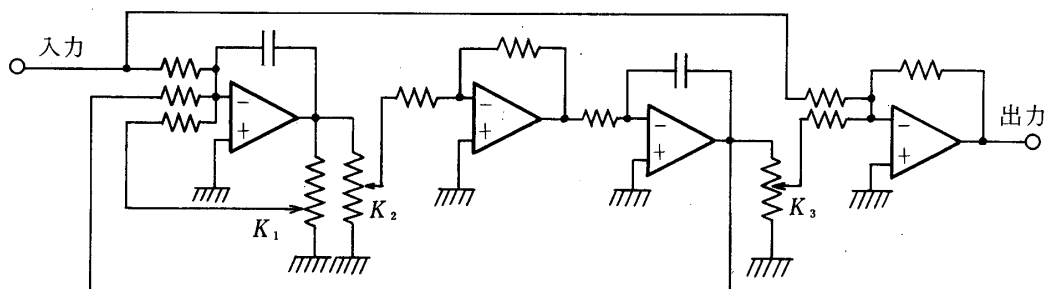
であって、 $|p_c| > |z_1|$, $|z_c| < |p_1|$ でなければならない。 $|p_c|$ と $|z_c|$ の距離が長いほど、振子運動の周期に誤差があったとしても有効である。しかし、あまり離れると $-p_1, -z_1$ の軌跡が右半面に入る恐れがあるとともに、他の軌跡への影響も出てくる。どの程度にするかは、ゴンドラや鏡筒の大きさ、駆動モータの特性などを考慮し、根軌跡を画いて選定してゆく必要があろう。第9図は補償回路 $G_c(s)$ のためのエレクトロニクス回路の構成図であって、伝達関数は

$$G(s) = \frac{s + K_1 s + K_2(1 - K_3)}{s + K_1 s + K_2} \quad (0 < K_3 < 1)$$



第8図 振子運動にたいする補償回路

($-p_1, -z_1$: 振子運動の極と零点)
($-p_c, -z_c$: 補償回路の極と零点)



第9図 補償回路の構成

となり、ゲイン K_1, K_2, K_3 を変えることにより、極と零点の間の距離、両者の原点および虚軸からの距離を調節できる。

4. 数値計算例

現在我々が開発を進めている気球搭載望遠鏡（写真1）を例題として、具体的数値を代入して制御系の応答を計算し、補償回路の効果を検証する。各パラメータの値は以下の通りである。

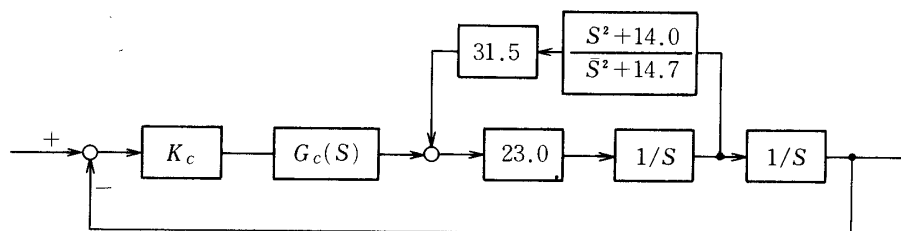
I_T : 鏡筒の慣性モーメント	10 kg · m ²
I_G : ゴンドラの慣性モーメント	200 kg · m ²
M : ゴンドラの質量	300 kg
l : 気球つりひもの長さ	20 m
r : ゴンドラの上端から重心までの距離	1 m
K_T : 駆動モータの電流・トルク定数	1 N · m/A
K_f : 駆動モータの逆起電力定数	1 Volt/rad/sec
n : 駆動モータの減速比	30 : 1
R : 駆動モータの内部抵抗	13 Ω

上記の値によって、第4図に示す制御系のブロック図に具体的数値を加えると第10図となる。そして、速度帰還ループ部分にある振子運動効果による極と零点の値は

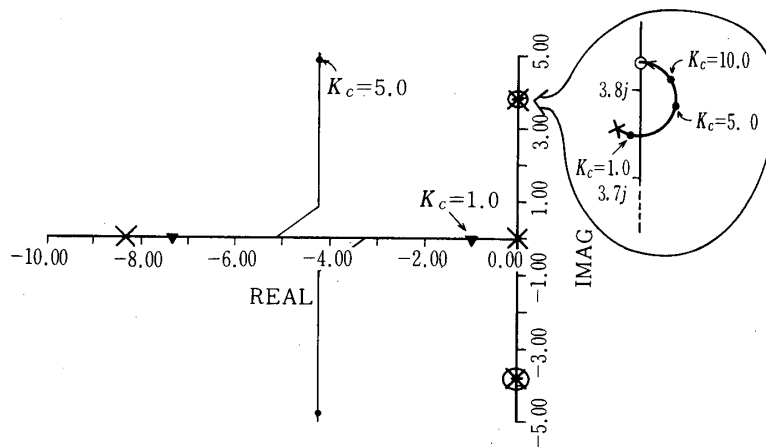
$$-p_{1,2} = \pm 3.74 j$$

$$-z_{1,2} = \pm 3.83 j$$

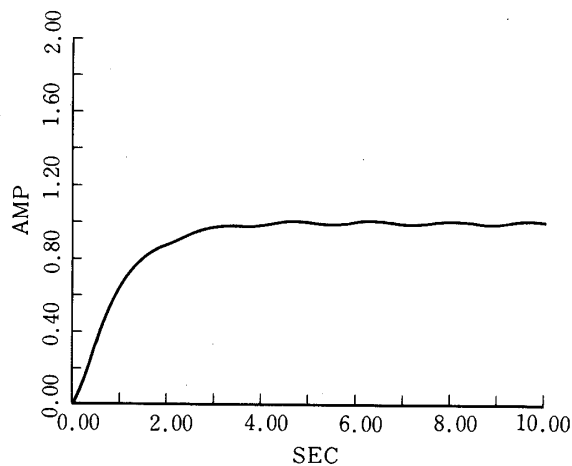
である。その結果、補償回路を加えない場合の根軌跡は第11図となる。そして、かろうじて安定な小さなゲインにおけるステップ応答は第12図のようになる。振子運動の減衰も悪いが、それ以上にステップ応答の立ち上がりが悪く、これでは精度の良い制御は望めない。ゲインを増大させてゆけば当然第13図のように振子運動は発散してゆき、制御不能となる。前者の応答の周波数特性を示したものが第14図である。曲線(i)が正弦波入力と出力の振幅比を示しており、(ii)は入力と制御偏差（ブロック線図上ではスターセンサ出力 θ_e ）との比である。追尾制御にとって目標の変動を引き起こす最大のものは、気球つりひもの長さで定まる長周期の振子運動である。第14図上の斜線部分はこの周波数範囲であるが、この領域では



第10図 気球搭載望遠の仰角制御例



第 11 図 補償回路のない場合の根軌跡

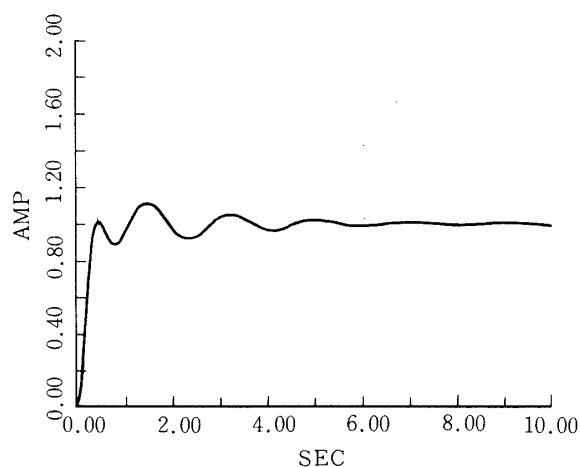
第 12 図 補償回路のない場合のステップ応答
(ゲイン $K_c = 1.0$)

制御偏差は -5 dB (約 $1/2$) でしかなく、制御系の応答が遅いため、長周期振子運動にはほとんど追従できないことを示している。

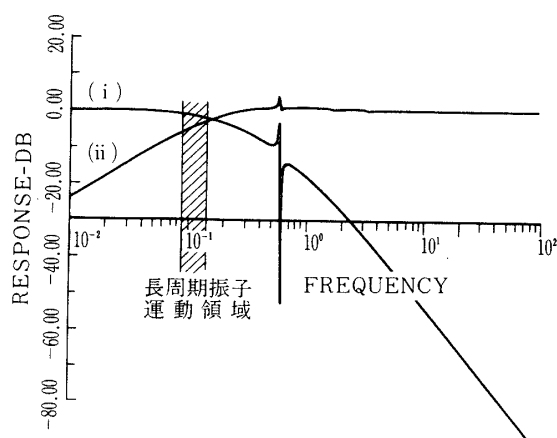
次に (3. 2) で述べた補償回路を挿入する。補償回路の伝達関数 $G_c(s)$ は

$$G_c(s) = \frac{(s + 0.1 + 3.5j)(s + 0.1 - 3.5j)}{(s + 0.1 + 4.0j)(s + 0.1 - 4.0j)}$$

でありその根軌跡は第 15 図となる。第 13 図に示した不安定となるゲインと同一のゲインでのステップ応答を第 16 図に示す。補償回路の効果により安定化したことがわかる。この場合



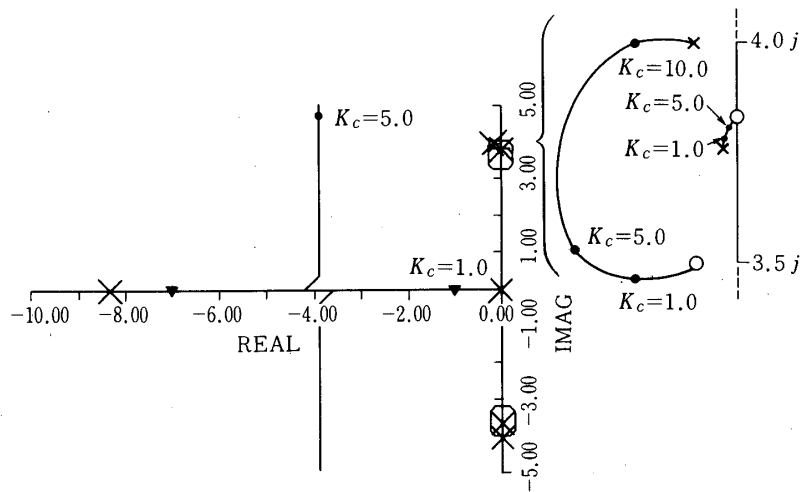
第13図 ゲインを上げ不安定となったステップ応答の例($K_c=5.0$)



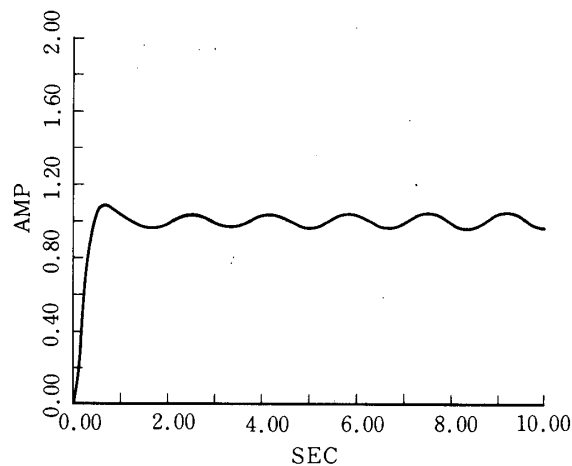
第14図 補償回路がない場合の周波数特性 ($K_c=1.0$)

の周波数応答を第17図に示す。長周期振子運動の周波数にたいしても、偏差は -20 dB となっている。すなわち追尾制御によって目標の変動を $1/10$ に減少させることができる。

この補償回路の効果を確認するため、実際に仰角の制御を行い、その制御偏差出力を記録したものが第18図である。実験は、ゴンドラをクレーンで 8 m ほど懸下し、人工光源を太陽電池による検出器で捕え追尾させた。波形の前半は、補償回路が入っていない場合であって、振子運動の振幅は増大してゆき、明らかに不安定な制御である。途中から補償回路を加えたが、その結果、振子運動は収束し、安定な制御に変わっていることがわかる。

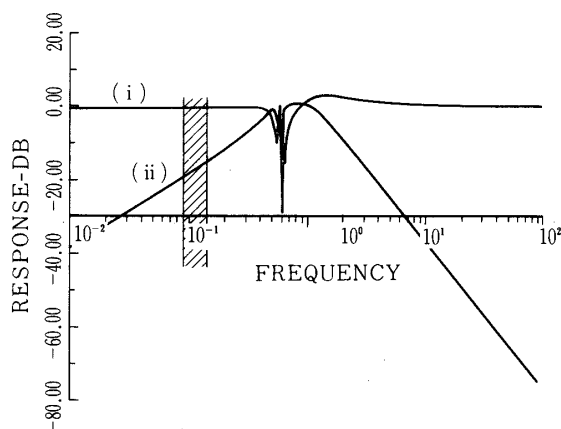


第15図 補償回路を加えた根軌跡

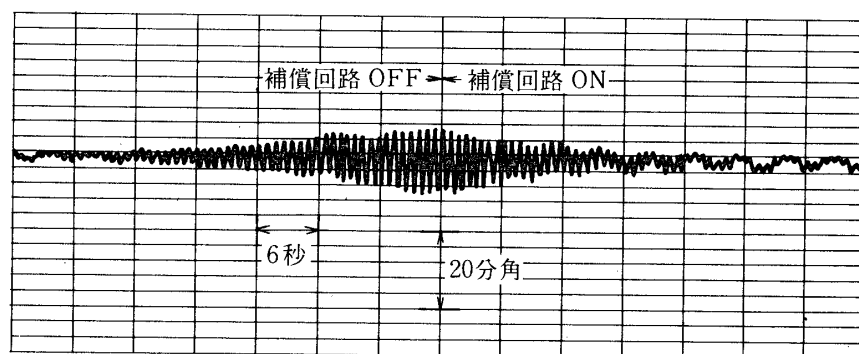
第16図 安定化されたステップ応答 ($K_c = 5.0$)

5. ま と め

ゴンドラの内部で望遠鏡の仰角を制御する際に、ゴンドラの振子運動を加振し制御が不安定となる問題を解析するとともに、制御エレクトロニクス回路に適切な補償回路を挿入することにより振子運動の増大を防ぎ、制御動作を安定化させ得ることを示した。気球より懸下されたゴンドラが2重振子を構成すること、鏡筒をモータで駆動すれば振子運動を大きくするであろうことは容易に考えられることである。しかしその現象を、望遠鏡がセンサで太陽や星を捕え、連続して追尾するというフィードバック制御ループの中に組み入れて解析するのは若干複雑な問題である。この点に関しては、以前より開発してきた、電子計算機による



第17図 安定化された場合の周波数応答



第18図

根軌跡の自動計算プログラムが有力な武器となった。

追尾制御を行う際に生ずるゴンドラの短周期振子運動は、以前より多少問題にされていた。とくに、ゴンドラの方角角を磁気センサで検出し“よりもどし制御”によって制御している場合には、ゴンドラ内部の鏡筒の動きによって生ずる振子運動成分は、2つの方向に感度を持つ磁気センサに検出されてしまい、方角角制御をも乱していた。こうした問題も、本論で述べた補償回路により回避することができるであろう。補償回路の効用は、実際の望遠鏡の制御システムで確認されたが、地上テストのみであり十分とは言えない。いずれその制御システムの放球テストが行われる予定であり、上空での動作も確認できる。

最後に、本論の内容は、前記気球搭載望遠鏡システムの検討の過程で取り上げられたものである。討論に参加され、有益な助言をいただいた東京大学宇宙航空研究所西村純教授をはじめとする方々に深く感謝する次第である。

1980年5月10日

参 考 文 献

- [1] 西村 純：“水平浮遊時における気球の動作について”，宇宙航空研究所報告，第7巻1号（C），（1971）257.
- [2] 矢島信之：“根軌跡の自動計算アルゴリズム”，第18回自動制御連合講演会予稿集，（1975）197.