

「よじれリアクション」制御方式

矢島 信之<sup>\*1</sup>・太田 茂雄<sup>\*1</sup>・並木 道義<sup>\*1</sup>・湊山 央樹<sup>\*2</sup>

“Yojire-Reaction” Azimuth Control System  
for Balloon Gondola

By

Nobuyuki Yajima, Sigeo Ohta, Michiyosi Namiki  
and Ohmi Fuchiyama

**Abstract:** A new type of attitude control system using a reaction wheel has been developed for an azimuth control of a balloon gondola. This control system has long rotation arms and dummy weights attached each end of them. These arms act as a fly-wheel with large moment of inertia and are driven by a geared DC motor. The fly-wheel and its driving mechanisms are attached to a top of gondola. Compared with a conventional reaction wheel control system which is installed in a gondola, this control system is compact, light weight and easy to handle.

This paper describes hardware characteristics and also control performance of this new system. This control system was applied to azimuth control of the astronomical telescope for infrared observations. The balloon experiments carried out two times at the National Scientific Balloon Facility at Palestine, Texas in May and June 1991. During the balloon flight, this control system worked well and accomplished precision raster scanning of the central region of the Galaxy with high accuracy which have been verified by the preliminary ground test. Some results of the flight tests are also described in this paper.

---

\*1 宇宙科学研究所

\*2 東海大学工学部

## 1. はじめに

ゴンドラの方角を制御する方法の一つにリアクションホイールを用いる方式がある。これまでに気球実験で試みられた例では、ゴンドラ内に搭載した直径30~50cm程度の大型の円盤状フライホイールをダイレクトドライブ型のDCモータで駆動している。また、この制御方式では、別に吊り紐の定常的よじれを除き、ホイールに蓄積された角運動量を放出させるため、吊り紐の途中にモータによる回転機構（よりもどしモータと同一物）を取り付ける。

上記リアクションホイール方式では、数分角程度の制御精度を実現できており、高い制御を必要とする観測実験に利用されている[1, 2]。問題点としては、大型のフライホイールをゴンドラ内に収納するため、観測器の配置等ゴンドラのデザインに制約を受け、全体の重量も増大する。そこで、より使い易く性能的にも優れたリアクションホイール方式を新たに開発することとした。

今回、新たに開発する契機となったのは、宇宙科学研究所赤外線天文部門を中心に進められている銀河領域の遠赤外線観測計画において、ゴンドラ方位角を振幅約5度角、周期的40秒で定速の往復走査を行いたいとの要請を受けたためである。ここでは、制御精度は±1分角程度、走査反転時の過渡応答時間は走査周期の1/10程度(3~5秒)に短くしたいとされた。こうした、速い応答速度と高い制御精度を合わせもつ制御は、高速回転する大型フライホイールの回転軸を傾けることでジャイロ効果によるトルクを発生させるCMGを用いた方式でのみ実現可能であったが、機構的により簡単な本方式でも実現できることが明らかになった。

## 2. 制御装置の概要

新たに開発したリアクションホイールシステムの概要図を図1に示す。従来の方式と異なり、フライホイールをゴンドラ内より出し、ゴンドラの上部の気球吊り紐との結合部に移した。かつ吊り紐の回転機構（よりもどし装置）と一体構成とすることでコンパクト化を図った。フライホイールは、回転軸より左右に棒状の腕をのばし、先端に質量を付けることで慣性モーメントと重量との比を向上させるとともに、腕の長さや先端の質量を変えることで、ゴンドラのサイズが変わった場合にも、フライホイールの慣性モーメントを制御システム設計に適合した値に簡単に合わせることもできるようにした。

フライホイール駆動モータは、これまで用いた高価で組立時の機械精度要求の厳しいダイレクトドライブモータをやめ、通常の20W程度のギヤヘッド付き小型DCモータを用いることとした。このモータの出力軸から、さらに1段外付けの減速歯車を介してリアクションホイールを駆動する。この減速比は、回転アームが外部に露出するので、取り扱い上の安全性を考慮し、最高回転数を1回転/秒程度になるように設定した。

リアクションホイールによってゴンドラが回転させられる際に発生する吊り紐のよじれを取り除くため、吊り紐を回転させなければならない。このための駆動機構には以下の2種の方式を試みた。

- (a) 駆動用の別のモータを用いず、リアクションホイールを駆動するモータからさらに減速して吊り紐を回転させる。この方式は、後に詳しく述べるように、定常制御後もリアクションホイールに周期的に変化する残留回転が残るといった難点があるものの、その量が十分小さく問題にならなければ、システム構成が簡単になるという利点がある。

- (b) 吊り紐を回転させるために別のモータを用いる。この方式は、従来のリアクションホイールとより戻し制御機構を組み合わせる方式と同一であるが、構造的には両者を一体構造として、外観上は(a)の方式と同一にし、システムの単純化を図った。この装置をゴンドラ上端に取り付けた状態を図2に示す。

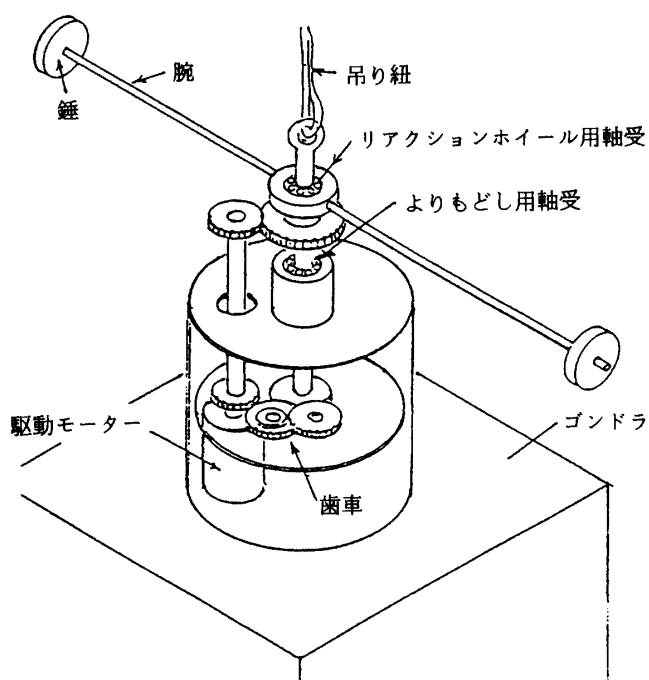


図1 「よじれリアクション方式」の制御機構の概要

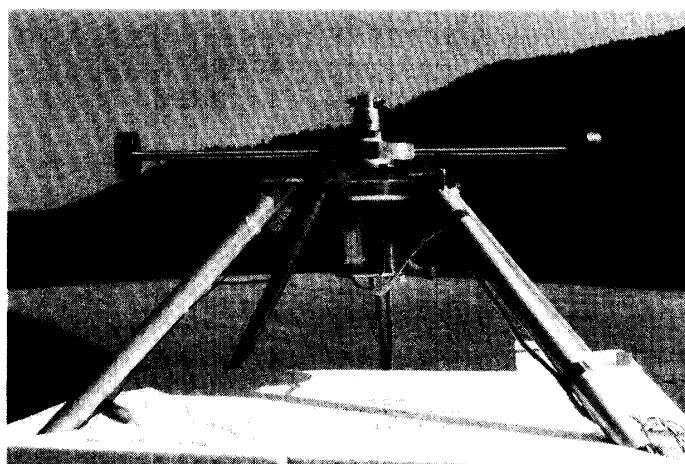


図2 ゴンドラに取り付けられた「よじれリアクション」制御機構

## 3. 制御動作

このよじれリアクションシステムは図3のようにモデル化される。ここで使用する記号は以下のとおりである。

- $\theta_G$  : ゴンドラ回転角  
 $\theta_w$  : リアクションホイール回転角  
 $\theta_m$  : よりもどし軸回転角.  
 $I_G$  : ゴンドラ慣性モーメント  
 $I_w$  : リアクションホイール慣性モーメント  
 $H_w$  : " 角運動量 ( $=I_w \cdot \theta_w$ )  
 $K_t$  :  $I_G/I_w$   
 $T_s$  : 吊り紐のねじれによるトルク  
 $T_m$  : リアクションホイール駆動モータの発生トルク  
 $k_s$  : つりひもばね定数.  
 $n$  : よりもどし軸とリアクションホイール軸との間の減速比  
 $\omega_0$  : 振子運動振動数 ( $=k_s/I_G$ )  
 $\omega_1$  : " ( $=k_s/n^2 \cdot I_w$ )  
 「'」 : 時間微分を表す.  
 「(0+)」 : 初期値を表す.  
 「, max」 : 最大値を表す.

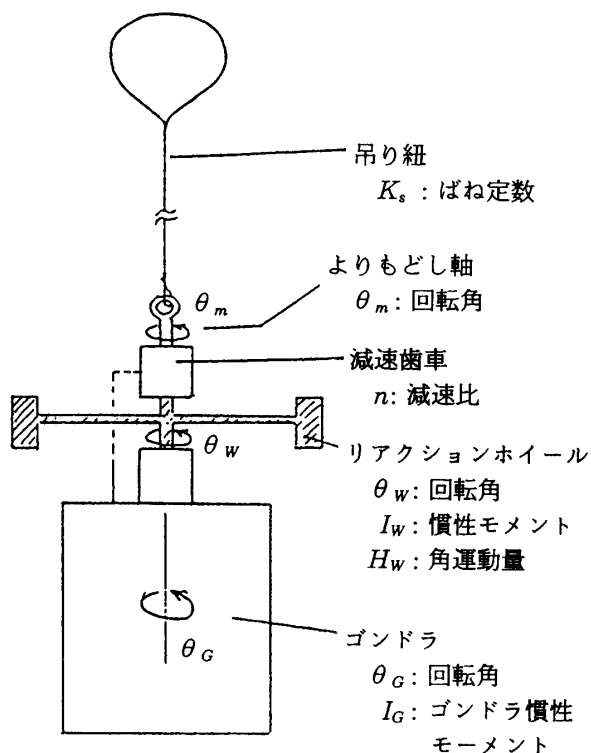


図3 制御システムのモデル

### 3.1 初期制御動作

ゴンドラが任意の方向の初期角度から制御が開始され、目標方向に近付き、線形領域に入るまでの制御である。この場合前提条件は以下のように仮定できる。

- (a) 偏差角が大きいため、制御出力は飽和し、モータには最大電圧が加わる。
- (b) モータは無視できる微小時間内で最大回転数に達し、フライホイールの回転数は  $\theta'_{W,\max}$  となる。

その時、ゴンドラが受ける速度  $\theta'_G(0_+)$  は、 $\theta'_G(0_+) = \theta'_{W,\max} \cdot I_W / I_G$  である。この条件下では、ゴンドラの運動を規定するトルクのバランス関係は、

$$I_G \cdot \theta''_G(t) = I_G \cdot \theta''_G(0_+) - k_s \{ \theta'_{m,\max} \cdot t + \theta_G(t) - \theta_G(0_+) \} \quad (1)$$

この式を解けば、ゴンドラ方位角  $\theta_G$  は次式となる。

$$\begin{aligned} \theta_G(t) = & + \{ \theta''_G(0_+) \cdot \omega_0^{-2} + \theta_G(0_+) \} - \theta''_G(0_+) \cdot \omega_0^{-2} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \\ & + \{ \theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max} \} \cdot \omega_0^{-1} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) - \theta'_{m,\max} \cdot t \end{aligned} \quad (2)$$

この式の右辺の各項の意味は、

第1+第2項：ゴンドラの初期角度分とつりひもの初期ねじれ角度の影響。

第3項：ゴンドラがリアクションホイールで駆動されて進む角度と吊り紐がよりもどし機構で捻られる角度との差の影響。

第4項：よりもどしで進む角。

である。

また、(2)式から、 $\theta'_G(t)$ 、 $\theta''_G(t)$  は各々以下の式となる。

$$\begin{aligned} \theta'_G(t) = & \theta''_G(0_+) \cdot \omega_0^{-1} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \\ & + \{ \theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max} \} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - \theta'_{m,\max} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta''_G(t) = \theta''_G(0_+) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \{ \theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max} \} \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (4)$$

ここで、もし減速比  $n$  を  $I_G = n \cdot I_W$  の関係を満たすようにすれば、(2)式の第3項は、

$$\theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max} = H_{\max} / I_G - H_{\max} / (n \cdot I_W) = 0 \quad (5)$$

となり、初期制御開始の  $\theta'_G(0_+)$ 、 $\theta''_G(0_+)$  がいずれも零であれば、吊り紐の影響はなくなる。

ここで、(2)、(3)式で得られる  $\theta_G(t)$  と  $\theta'_G(t)$  を、吊り紐の回転ばね定数  $k_s = 0.1 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$ 、リアクションホイール慣性モーメント  $I_G = 1 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$  最大角運動量  $H_{W,\max} = 5 (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec})$ 、減速比  $n = 25$  として、ゴンドラ慣性モーメント  $I_G$  の値を変えて求めたものが図4である。 $I_G = 25 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$  の時のみリアクションホイールだけの効果でゴンドラは直線的に動いていて、他は吊り紐の影響で変化していることが分かる。

### 3.2 線形制御に入る条件

#### 3.2.1 線形制御中のリアクションホイールの残留回転

ゴンドラが目標の方向を向き、線形制御が開始された時、リアクションホイールの動作が飽和せず、線形制御を続けられるための条件は、

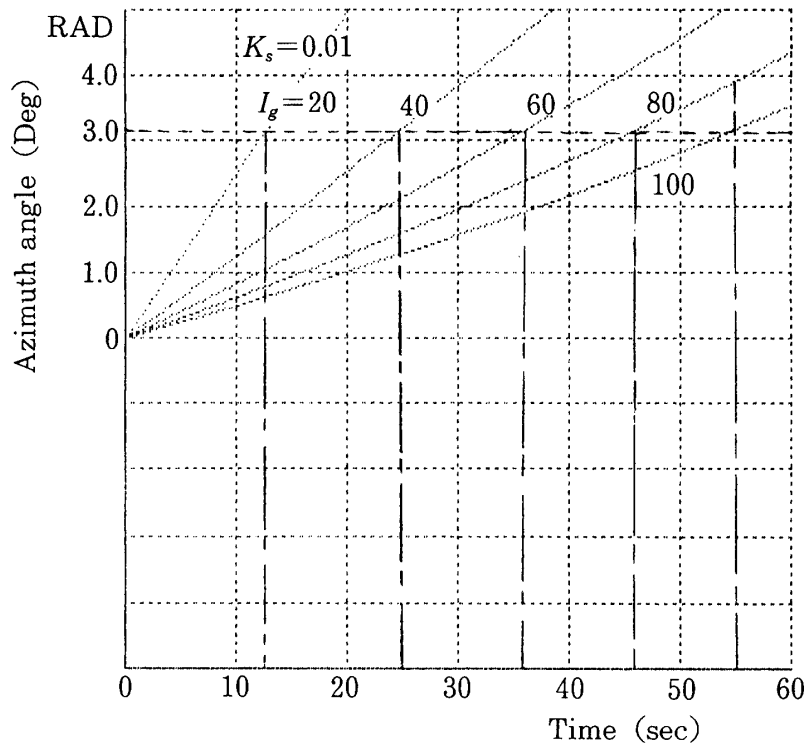


図4 初期制御におけるゴンドラの回転角度と回転速度

- (a) 線形制御開始時にリアクションホイールに残る定常回転数  $d\theta'_w$  が、飽和値以下であること、
- (b) 誠意型制御開始時に吊り紐に残っている捻れ角  $d\theta_s$  の影響で増大するリアクションホイールの回転数が飽和値以下であること、
- である。

(b) の吊り紐の残留捻れ  $d\theta_s$  と、それによって発生するリアクションホイールの回転数  $d\theta'_w$  の間には、線形制御中のゴンドラの動きは無視できるほど小さいとすれば、次式のトルクバランスが成り立つ。

$$I_w \cdot d\theta''_w = -k_s \cdot d\theta_s \quad (6)$$

(1) 駆動モータが一つの場合

吊り紐の駆動モータがリアクションホイールを駆動するモータと同一である方式では、 $\theta_w = n\theta_s$  であるから上式(6)は、

$$I_w \cdot \theta''_w = -k_s \cdot \theta_w / n \quad (7)$$

となり、リアクションホイールには次式のように周期的に変化する非減衰の回転成分  $\theta'_R$  が残留する。

$$\theta'_R = A \cdot \cos(\omega_2 / \sqrt{n})t + B \cdot \sin(\omega_2 / \sqrt{n})t \quad (8)$$

$$(\omega_2^2 = k_s / I_w)$$

ここで、振幅  $A$  は線形制御に入った時のリアクションホイールの回転数  $d\theta_w$  であり、振幅  $B$  は吊り紐のよじれ  $d\theta_s$  による量である。後者は、吊り紐のよじれとリアクションホイールの回転との間にエネルギー保存則が成り立つので、

$$I_w \cdot d\theta'_w{}^2 / 2 = k_s \cdot d\theta_s^2 / 2 \quad (9)$$

の関係が成立し、 $B$  は  $d\theta'_w = k_s / I_w \cdot d\theta_s = \omega_2 \cdot d\theta_s$  である。すなわち (8) 式は、

$$\theta'_R = d\theta'_w \cdot \cos(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) + d\theta_s \cdot \omega_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) \quad (8')$$

従って、 $\theta'_R$  の最大値を  $\theta'_{R,MAX}$  とすれば、

$$\theta'_{R,MAX}{}^2 = (d\theta'_w)^2 + (d\theta_s \cdot \omega_2)^2 \quad (10)$$

である。このリアクションホイールの残留回転は、ゴンドラが正しく制御されて動かないほど非減衰で、線形制御中いつまでも持続する。この残留回転は当然リアクションホイールの最高回転数より小さくしなければ線形制御領域に留まらず、かつその値が小さい方が望ましい。この残留回転が発生する要因は、

- (a) 制御系自体の動作によって発生するもの、
  - (b) 制御開始時に吊り紐に初期捻れやゴンドラに初期回転速度、すなわち制御開始時に外乱がある場合、
- の二つに分類される。

こうした残留回転は、視点を変えれば、吊り紐のよじれにより生じるリアクションホイールの回転のアンローディング動作が、駆動モータを一台に簡単化したため、回転を零となるように完全には行われず、ある一定の周期的に変動する成分として吸収している、と考えることもできる。

## (2) 駆動モータが二つの場合

リアクションホイールの駆動と吊り紐の駆動に別々のモータを用いる場合には、式 (10) で、 $\theta_w$  と  $\theta_s$  は独立に制御できるので、吊り紐を駆動するモータの操作信号にリアクションホイールの回転速度だけでなくその微分項を加えると、

$$\theta_s = (\theta_w + K_D \cdot \theta'_w) / n \quad (K_D: \text{微分項のゲイン定数}) \quad (11)$$

となり、(6) 式は、

$$I_w \theta''_w + k_s \cdot K_D \cdot \theta'_w / n + k_s \cdot \theta_w / n = 0 \quad (12)$$

となるので、 $\theta'_w$  の項で減衰をあたえることができる。これは、従来のリアクションホイール制御方式で行われていることである。この場合の残留回転の減衰係数を  $\zeta_w$  とすれば、

$$\zeta_w = K_D \cdot \omega_2 / (2 \cdot \sqrt{n}) \quad (13)$$

であり、例えば  $n=25$ 、 $\omega_2=3.2$  であるとすれば  $K_D=10$  で  $\zeta_w=0.32$  となる。

この制御の場合には、リアクションホイールの残留回転は完全に零に収束するので、アンローディング動作としては、駆動モータが一台の場合に比べ完全となる。

### 3.2.2 制御系の動作により発生するリアクションホイールの残留回転

初期制御が始まる直前の条件はすべて零、すなわち、ゴンドラの回転数は零、吊り紐の

よじれも零 ( $\theta''G(0_+) = 0$ ) であるとする。  $t_0$  秒後にゴンドラは目標角  $\theta_{obj}$  に達したとすれば、その時点でリアクションホイールは逆転してゴンドラを止めようとする。 その際もし、ゴンドラの回転速度が制御開始時と同じでなく差が生じていれば、リアクションホイールの回転数は零にならず、ある残留値を持つ。 その量  $d\theta_w$  は、式 (3), (4) より、

$$\begin{aligned} d\theta'_w &= \{\theta'_G(0_+) - \theta'_G(t_0)\} \cdot I_G / I_w \\ &= \{\theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max}\} \{1 - \cos(\omega_0 \cdot t_0)\} K_I \end{aligned} \quad (14)$$

となる。 ただしここで、  $K_I = I_G / I_w$ 。

また、吊り紐によじれ角  $d\theta_s$  が残っていれば、それにより発生するリアクションホイールの残留回転  $d\theta'_w = d\theta_s \cdot \omega_2$  は、

$$\begin{aligned} d\theta_s \cdot \omega_2 &= \theta''_G(t_0) \cdot I_G \cdot \omega_2 / k_s \\ &= \{\theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max}\} \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \cdot I_G \cdot \omega_2 / k_s \\ &= \{\theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max}\} \cdot \sqrt{K_I} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \end{aligned} \quad (15)$$

この  $d\theta_w$  と  $d\theta_s \cdot \omega_2$  を (8) 式に代入すれば、  $\theta'_{R,\max}$  が得られる。 すなわち、

$$\begin{aligned} \theta'_R &= d\theta'_w \cdot \cos(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) + d\theta_s \cdot \omega_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) \\ &= \sqrt{K_I} \{ \theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max} \} [ \sqrt{K_I} \{ 1 - \cos(\omega_0 \cdot t_0) \} \cos \\ &\quad (\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) + \sin(\omega_0 \cdot t_0) \cdot \sin(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) ] \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、最大値  $\theta'_{R,\max}$  は、以下となる。

$$\begin{aligned} \theta'_{R,\max}{}^2 &= (d\theta'_w)^2 + (d\theta_s \cdot \omega_2)^2 \\ &= K_I \cdot \{ \theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max} \}^2 \cdot [ K_I \{ 1 - \cos(\omega_0 \cdot t_0) \}^2 + \sin^2(\omega_0 \cdot t_0) ] \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、よりもどし軸の最大回転数  $\theta'_{m,\max}$  がゴンドラの初期回転数  $\theta'_G(0_+)$  と同じでなく誤差を持っているため、  $\theta'_G(0_+) + \theta'_{m,\max} = k_e \theta'_G(0_+)$  ( $k_e$ : 誤差成分) であるとするれば、式 (17) は、

$$\begin{aligned} \theta'_{R,\max} \cdot I_w / \{ I_G \theta'_G(0_+) \} \\ = k_e \cdot \sqrt{ \{ 1 - \cos(\omega_0 \cdot t_0) \}^2 + K_I^{-1} \cdot \sin^2(\omega_0 \cdot t_0) } \end{aligned} \quad (17')$$

ここで、  $I_w \cdot \theta_{w,\max} = I_G \cdot \theta'_G(0_+)$  であるので、上式の左辺は、

$\theta'_{R,\max} / \theta'_{w,\max}$  となり、リアクションホイール残留回転数と最大回転数との比となる。

この (17') 式の  $t_0$  にたいする最大値は、  $\cos(\omega_0 \cdot t_0) = -1$  の時で、  $\theta'_{R,\max} / \theta'_{w,\max} = 2 \cdot k_e$  である。 この値がリアクションホイールの最高回転数より小さければ、  $\omega_0 \cdot t_0$  がどのような値の時でも無条件で線形制御領域に入り、留まることができる。 もし、リアクションホイールの残留回転数を最大回転数の 10% 以下とするには、よじれもどしモータの回転数を 5% 以下に合わせる必要があることになる。

ただし、もし残留回転数の最大値が最高回転数より大きくても、  $\theta'_{R,\max}$  は時間  $t_0$  とともに増大するので  $t_0$  が小さい場合、すなわち初期制御開始時に目標までの偏差角度が小さく、短時間で線形制御領域に入った場合には、  $\theta_{R,\max}$  も小さいので線形制御が続けられることになる。 また、吊り紐のねじればね定数  $k_s$  が小さい場合にも、  $\omega_0 = \sqrt{k_s / I_G}$  が小さくなるので、  $t_0$  が小さくなったことと相対的に同じとなり、やはり  $\theta_{R,\max}$  が小さくなる。  $k_s$  が小



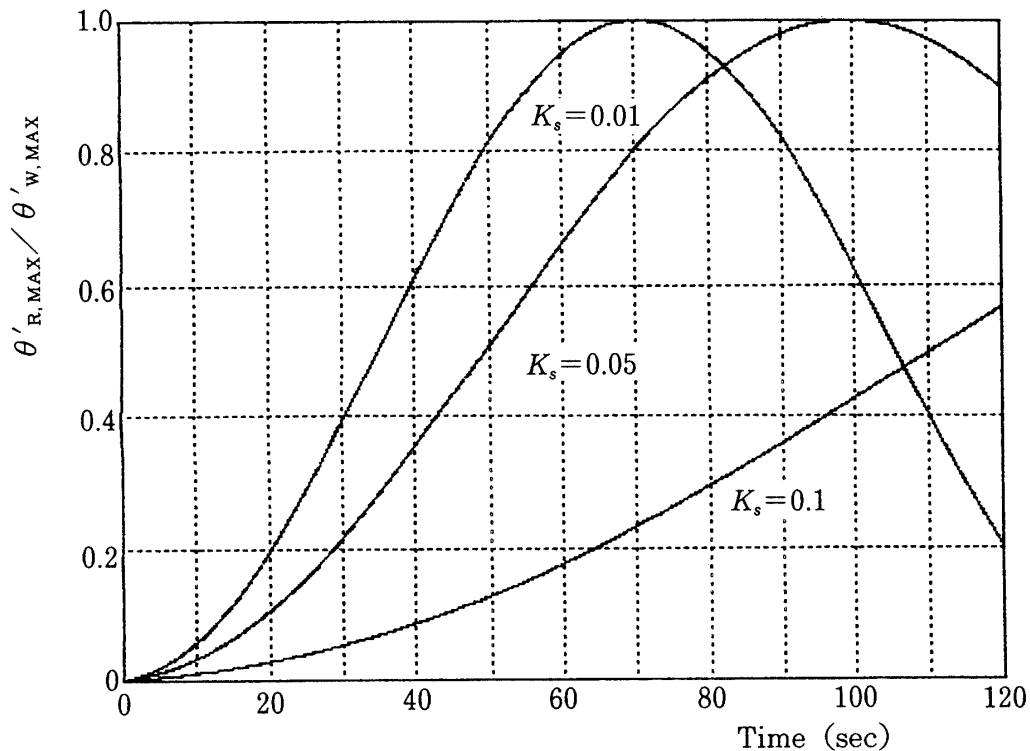


図5 リアクションホイールの残留回転数

さい場合に、よりもどし用のモータを省略し、リアクションホイール駆動モータで兼用できるのは、このように残留回転数  $\theta_{R,MAX}$  が  $k_s$  とともに小さくなるからである。

例えば、 $K_I = I_G / I_W = 50$  の場合に、 $\theta_G(0_+)$  と  $\theta_{m,max}$  の間に 50% の誤差 ( $k_e = 0.5$ ) があるとした場合の、 $t_0$  と  $\theta_{R,MAX}$  との関係を示すと図5となる。吊り紐のばね定数  $k_s$  が小さい場合 (吊り紐が細く 1 本の場合) には、同じ  $t_0$  に対して  $\theta_{R,MAX}$  は小さいので、リアクションホイールの残留回転数は小さく、制御可能領域に留まる可能性が大きい。逆に吊り紐がマルチワイヤのように  $k_s$  が大きい場合には、残留回転が大きくなる。従って前者の場合には、リアクションホイールを駆動するモータとよりもどしモータとを兼用できるが、後者の場合には別のモータを用い残留回転を零に減衰させる必要がある。

### 3.2.3 初期制御への外乱によるリアクションホイールの残留回転

初期制御を開始するときの制御系の初期条件、すなわちゴンドラの回転速度と吊り紐のよじれは、気球の回転により誘起されるゴンドラの吊り紐まわり回転振子運動に起因すると考えられる。いま気球とゴンドラが一体で  $\theta'_B$  で回転していたのが、気球のみが突然停止して、ゴンドラに吊り紐回りの回転振子が誘起されたものとすれば、ゴンドラの運動は  $\theta'_G = \theta'_B \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$  ( $\omega_0^2 = k_s / I_G$ ) となる。ここでは、この振子運動の任意のタイミングで初期制御が開始されたとして、その場合のリアクションホイールの残留回転数への影響を考える。制御開始時の振子運動によるゴンドラの回転速度を  $\theta'_G(0)$ 、吊り紐の捻れ角を  $\theta_s$  と

すれば、エネルギー保存則から、

$$I_G \cdot \theta_B'^2 / 2 = I_G \cdot \theta_G'^2(0) / 2 + k_s \cdot \theta_s^2 / 2 \quad (18)$$

であるから、

$$\theta_s^2 = (\theta_B'^2 - \theta_G'(0)^2) \cdot I_G / k_s \quad (19)$$

である。従って、初期制御開始時のゴンドラの角速度  $\theta_G''(0_+)$  は、

$$\begin{aligned} \theta_G''(0_+) &= k_s \cdot \theta_s / I_G \\ &= \omega_0 \cdot \sqrt{(\theta_B'^2 - \theta_G'(0)^2)} \end{aligned} \quad (20)$$

となる。この  $\theta_G'(0)$ 、 $\theta_G''(0_+)$  を初期条件として、制御が開始され、 $t_0$  秒後に線形制御に入ったとすれば、そこでのゴンドラの手速度  $\theta_G(t_0)$  と角加速度  $\theta_G''(t_0)$  は、減速比  $n$  が正しく選ばれ、 $\{\theta_G'(0_+) + \theta'_{m,\max}\} = 0$  とすれば、(3)、(4) 式より以下となる。

$$\begin{aligned} \theta_G'(t_0) &= \theta_G''(0_+) \cdot \omega_0^{-1} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \\ &\quad + \{\theta_G'(0_+) + \theta'_{m,\max}\} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) - \theta_{m,\max} \\ &= (\theta_B'^2 - \theta_G'(0)^2) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) + \theta_G'(0) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) - \theta'_{m,\max} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \theta_G''(t_0) &= \theta_G''(0_+) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) + \{\theta_G'(0_+) + \theta'_{m,\max}\} \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \\ &= \omega_0 \cdot (\theta_B'^2 - \theta_G'(0)^2) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) + \theta_G'(0) \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \end{aligned} \quad (22)$$

その時にリアクションホイールに蓄積される残留回転数は 3.2.2 の (14)、(15) 式と同様に、

$$\begin{aligned} d\theta'_w &= \theta_G'(t_0) - \theta'_{m,\max} / I_G \cdot I_w \\ &= \{\sqrt{(\theta_B'^2 - \theta_G'(0)^2)} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) + \theta_G'(0) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0)\} \cdot K_I \\ &= \theta'_B \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0 - \phi 1) \cdot K_I \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} d\theta_s \cdot \omega_2 &= \theta_G''(t_0) \cdot I_G \cdot \omega_2 / k_s \\ &= \{\omega_0 \cdot (\theta_B'^2 - \theta_G'(0)^2) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) \\ &\quad + \theta_G'(0) \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0)\} \cdot I_G \cdot \omega_2 / k_s \\ &= \sqrt{(K_I)} \cdot \theta'_B \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0 - \phi 2) \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、 $\sin \phi 1 = \theta_G'(0) / \theta'_B \cdot K_I$ 、

$$\cos \phi 2 = \sqrt{(K_I)} \cdot \theta'_B / \theta_G'(0) \cdot \omega_0 \cdot I_G \cdot \omega_2 / k_s$$

したがって、リアクションホイールの残留回転数は両者の合計として、

$$\begin{aligned} \theta'_R &= d\theta'_w \cdot \cos(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) + d\theta_s \cdot \omega_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) \\ &= \theta'_B \cdot K_I \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0 - \phi 1) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) \\ &\quad + \sqrt{(K_I)} \cdot \theta'_B \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0 - \phi 2) \cdot \sin(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) \end{aligned} \quad (25)$$

典型的例として、ゴンドラの回転振子運動が最大回転数で吊り紐の捻れが零となった時点で初期制御が開始されたとすれば、 $\theta_G'(0) = \theta'_B$ 、 $\theta_G''(0_+) = 0$  であるから、

$$d\theta'_w = \theta'_B \cdot K_I \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) \quad (26)$$

$$d\theta_s \cdot \omega_2 = \sqrt{(K_I)} \cdot \theta'_B \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \quad (27)$$

となり、 $\theta'_R$  は、

$$\begin{aligned}
\theta'_R &= d\theta'_W \cdot \cos(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) + d\theta_S \cdot \omega_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) \\
&= \theta'_B \cdot K_I \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n}) \\
&\quad + \sqrt{(K_I)} \cdot \theta'_B \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \cdot \sin(\omega_2 \cdot t / \sqrt{n})
\end{aligned} \tag{28}$$

となるので、 $\theta'_R$ の最大振幅値 $\theta'_{R,MAX}$ は、

$$\begin{aligned}
\theta'_{R,MAX} &= (d\theta'_W)^2 + (d\theta_S \cdot \omega_2)^2 \\
&= \theta'^2_B \cdot K_I \{K_I \cdot \cos^2(\omega_0 \cdot t_0) + \sin^2(\omega_0 \cdot t_0)\}
\end{aligned} \tag{29}$$

また、初期制御開始時の条件が、振子運動のゴンドラの回転が零、吊り紐の捻れが最大となる点であるとすれば、

$$d\theta'_W = \theta'_B \cdot K_I \cdot \sin(\omega_0 \cdot t_0) \tag{30}$$

$$d\theta_S \cdot \omega_2 = \sqrt{(K_I)} \cdot \theta'_B \cdot \cos(\omega_0 \cdot t_0) \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
\theta'_{R,MAX} &= (d\theta'_W)^2 + (d\theta_S \cdot \omega_2)^2 \\
&= \theta'^2_B \cdot K_I \{K_I \cdot \sin^2(\omega_0 \cdot t_0) + \cos^2(\omega_0 \cdot t_0)\}
\end{aligned} \tag{32}$$

$\theta'_{R,MAX}$ の $t_0$ についての最大値は、式(29)では $\cos^2(\omega_0 \cdot t_0) = 1$ 、式(32)では $\sin^2(\omega_0 \cdot t_0) = 1$ の時、いずれも、 $\theta'_{R,MAX} = \theta'_B \cdot I_G / I_W$ である。気球の回転速度 $\theta'_B$ は、フライト中の実測値から、大きい場合でも0.01 rad/sec (0.1rpm)であるので、 $I_G / I_W = 50$ 程度であれば、 $\theta'_{R,MAX} = 0.5$  rad/secであるから、リアクションホイールの最大回転(5 rad/sec, 約1 rps)の1/10程度にすぎず、線形制御の範囲で十分吸収可能である。

### 3.3 線形制御領域

3.2で述べた初期制御が終わり、ゴンドラの方角が目標方向に接近し、リアクションホイールの回転速度が線形制御領域に入ってから動作を考える。図1のモデルをもとに、駆動モータに入力電圧 $e(t)$ を加えた場合の運動方程式を求めると、

$$n^2 \cdot I_W \cdot \theta''_W = T_m + T_s \tag{33}$$

$$I_G \cdot \theta''_G = -T_m \tag{34}$$

$$T_s = k_s \theta_m \tag{35}$$

$$T_m = n \cdot k_T \cdot R \cdot e(t) - n \cdot K_T \cdot K_F \cdot R \cdot (\theta'_m - \theta'_G) \tag{36}$$

(8)~(10)式をラプラス変換し、入力 $E(s)$ と出力 $\Theta_G(s)$ との伝達関数 $G(s)$ として整理すると、

$$\begin{aligned}
G(s) &= \Theta_G(s) / E_m(s) \\
&= n \cdot K_T \cdot (s^2 + \omega_1^2) / \{(R \cdot I_G \cdot s \cdot (s^3 + n^2 K_m \cdot I^{-1} \cdot s^2 + \omega_1^2 \cdot s + K_m \cdot \omega_0^2))\}
\end{aligned} \tag{37}$$

となる。ここで、 $\omega_0^2 = k_s / I_G$ 、 $\omega_1^2 = k_s / (n^2 \cdot I_W)$ 、 $1/I = 1/I_G + 1/(n^2 \cdot I_W) \sim 1/I_G$ である。また、 $K_m$ はモータ定数で、

$$K_m = K_T \cdot K_F / R$$

ただし、 $K_T$ : 電流トルク定数、 $K_F$ : モータ逆起電力定数、 $R$ : 内部抵抗である。

(12)式をもとに、制御システムのブロック図を描くと図6となる。ここで吊り紐が充分長いとして、 $k_s \sim 0$ とすれば、

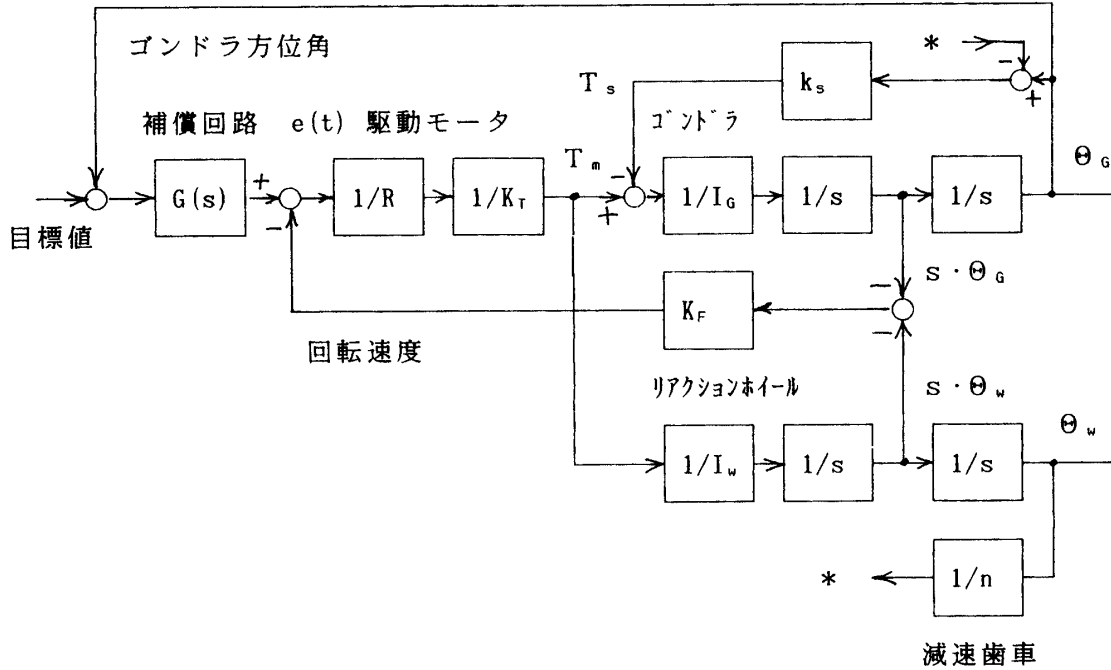


図6 よじれリアクション制御の線形制御のブロック図

$$G(s) = n \cdot k_m / \{k_f \cdot I_G \cdot s(s + n^2 \cdot K_m / I_G)\} \tag{37}$$

となる。この式は、減速比  $n$  の歯車を介して、モータで直接ゴンドラを駆動して制御していることと等価である。制御特性を決めるパラメータは、時間遅れ時定数  $T_d = I_G / K_m \cdot n^2$  であり、その値は後術するように小さくできるので、十分速い応答を実現できる。

#### 4. 試作した制御装置と実験結果

##### 4.1 試作システム

試作した制御システムのマカニズム部の諸元を表1に示す。駆動モータには、20WクラスのDCモータにギヤヘッドがついたものを用い、その出力軸にリアクションホイールを駆動するためにさらに外付けの減速歯車(減速比  $n_1$ )を付け、さらにその先に減速比  $n_2$  の歯車を付けて気球吊り紐を回転させる。

モータを駆動するパワーアンプは、PWM変調方式を用いた速度制御ループを持った市販のサーボモータ駆動用アンプを用いた。

この表に示す特性によれば、式(38)における遅れ特性  $T_d$  は、ゴンドラ慣性モーメント  $I$  を  $50\text{kg}\cdot\text{m}^2$  とすれば、

$$\begin{aligned} T_d &= I_G \cdot R / (K_r \cdot K_f \cdot n^2) \\ &= 50 \cdot 9.5 / (21.25^2) = 0.04(\text{sec}) \end{aligned}$$

となる。通常、外乱の変動周期は30秒以上であるから、それにたいし  $T_d$  は十分小さいので、精度の良い制御を実現できることがわかる。

表 1

項 目	数 値	備 考
駆動モータ		
電流／トルク定数 (N/A)	0.042	
逆起電力定数 (V/rad/sec)	0.044	
内部抵抗 ( $\Omega$ )	9.5	
最大回転数 (rad/sec)	600	
ギャヘッド減速比	17.6	
モータ／ホイール間減速比 ( $n_1$ )	6	
ホイール／よりもどし間減速比 ( $n_2$ )	25	
リアクションホイール		
腕の長さ (m)	0.5	1m 程度まで可変
錘 (kg)	3.2 (両側)	5 kg 程度まで可変
慣性モーメント (kg m)	0.85	
最大回転数 (rad/sec)	600/105.6=5.7	
最大角運動量 (N m sec)	5.	
サイズ (m)	0.2 $\phi$ ×0.3	リアクション・
重量 (kg)	5.0	ホイール部を除く
電 源		
モータ駆動部 (Volts)	24	
演算制御部 ( )	±15	
消費電力	約50W	ピーク時
	約10W	定常制御時

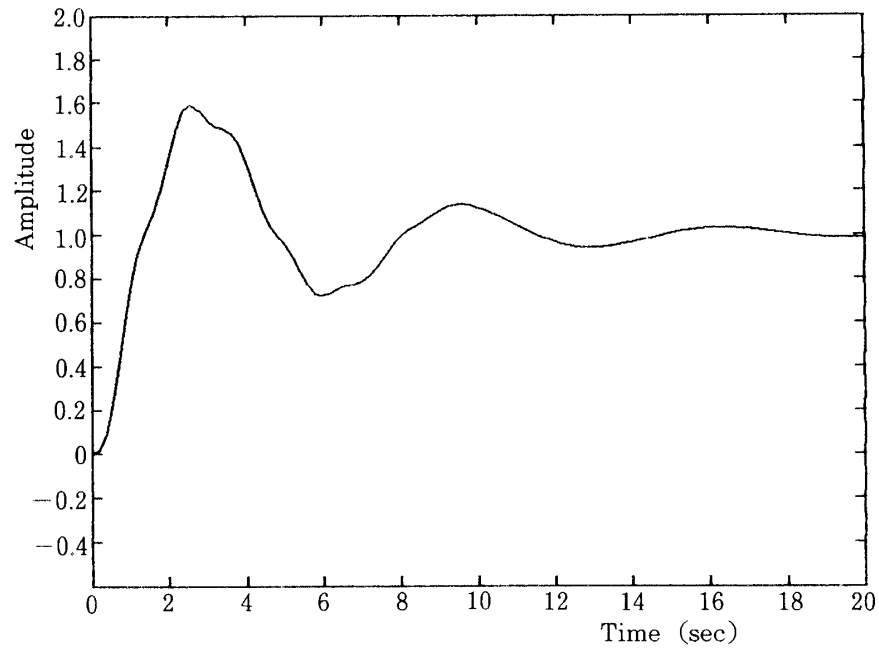
#### 4.2 コンピュータシミュレーション

(12)式で表される伝達関数を開ループ特性とし、表1に示す駆動モータの特性およびゴンドラ慣性モーメントを  $50\text{kg}\cdot\text{m}^2$  とし、テップ応答、ランプ応答を計算した。ランプ応答は赤外線を観測する場合の往復速度制御に対応し、定速度制御であるので、定常偏差を完全に零とするため、制御系には積分補償回路、 $(s+1)/s$  を加えている。

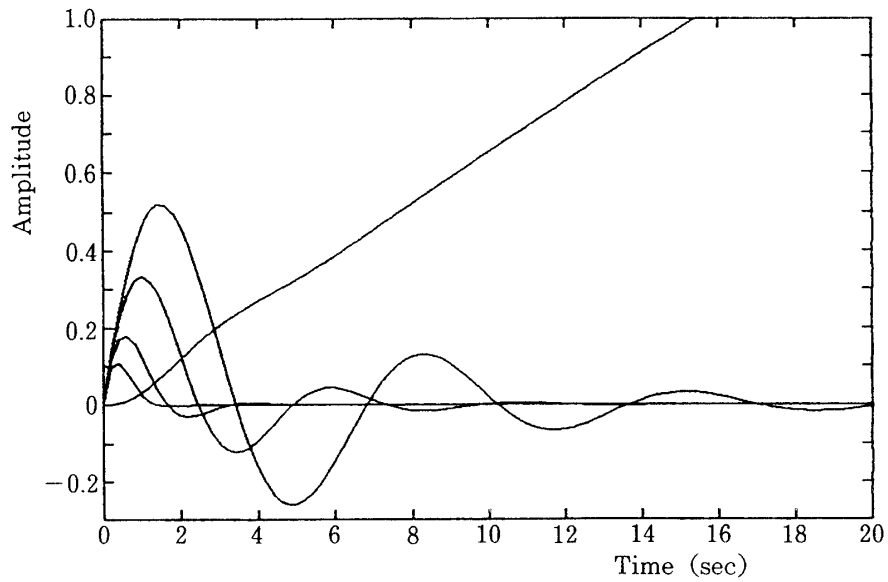
ステップ応答は図7(a)となる。過渡応答時間は約10秒であり、この程度の慣性負荷が加わったよりもどし制御に比べ、5倍以上速い制御となっている。

ランプ応答の計算結果を図7(b)に示す。図には、応答波形と偏差を重ねて表示しており、偏差は制御ゲイン10, 20, 50, 100の場合を示し、ランプ入力に対する応答はゲイン20の場合のみ示している。縦軸は任意軸であり、制御偏差は応答波形の10倍の尺度で描いている。

なお、制御偏差は過渡状態であるランプ入力の開始時に発生するが、実際の制御では、制御方向が反転するので、この偏差の2倍となる。そうした量を考慮しても、過渡状態は5秒以内に収束しており、走査時間幅の1/10以下という観測要求を満たしている。制御偏差の最大値は、ゲイン20の場合、ランプ入力の傾斜(走査度)を0.2度/秒(8度/40秒)とすれば、偏差信号の最大値は、図よりランプ信号の約3秒後の値と同じであるから、 $0.2 \times 3 \times 0.1 \times 60 = 3.6$  (分) となる。実際はこの2倍の7.2分が偏差のピーク値である。



(a) ステップ応答



(b) ランプ応答

図7 よじれリアクション制御のシミュレーション結果

### 4.3 室内実験結果

試作した制御システムを赤外線観測用ゴンドラに取り付け、室内でクレーンから3~4m程度吊り下げて制御動作のテストを行った。ここで、方位角は地磁気センサで求め、その出力に目標値となる制御信号を加算し、その電圧に相当する角度分だけゴンドラの方位角が変化するようによじれリアクションシステムで制御した。制御システムの構成図と各部のゲインを図8に示す。

図9は、目標値として三角波信号を加え、実際の気球観測の場合と同様にゴンドラの方位角を制御し、制御偏差、応答特性を求めた記録である。図に示すように、目標値の変化幅は

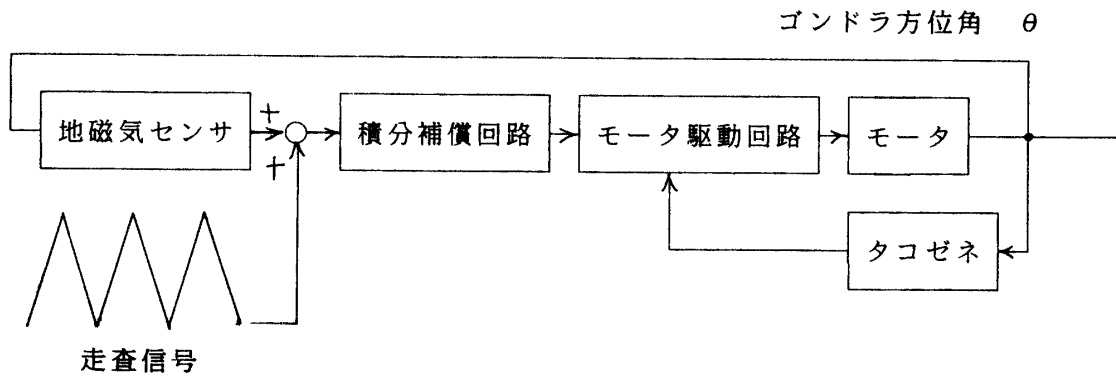


図8 制御システムの構成

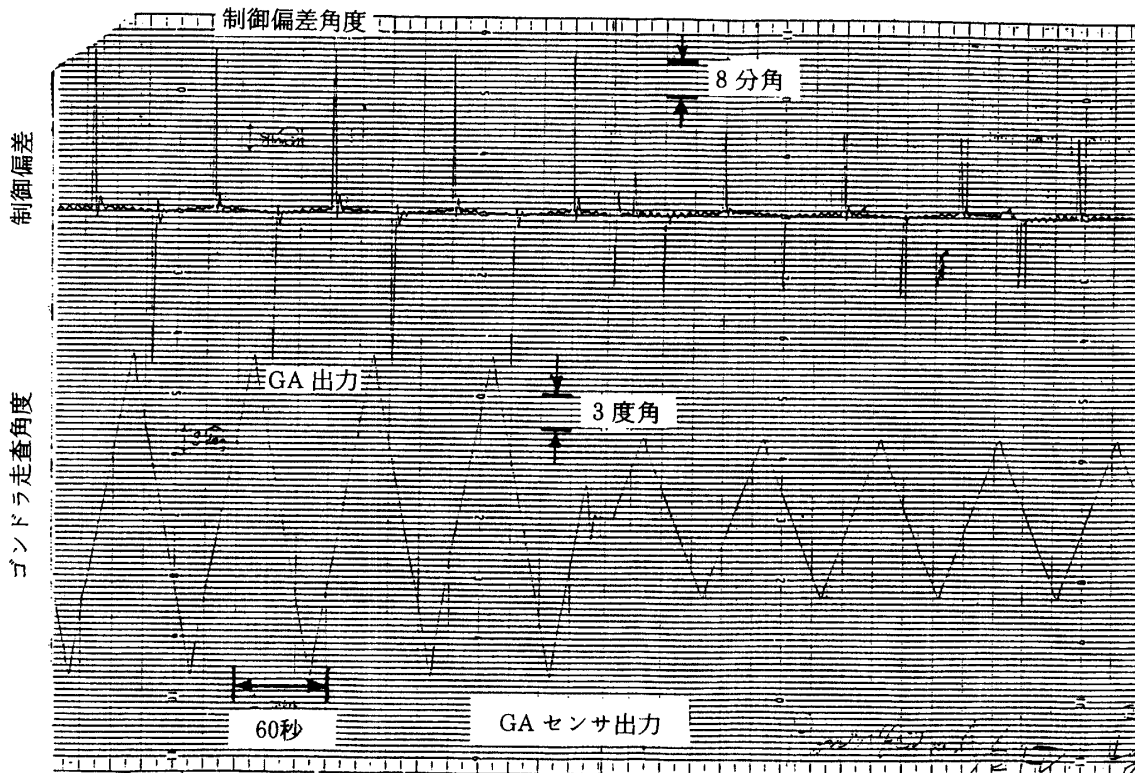


図9 「よじれリアクション方式」による室内制御実験例

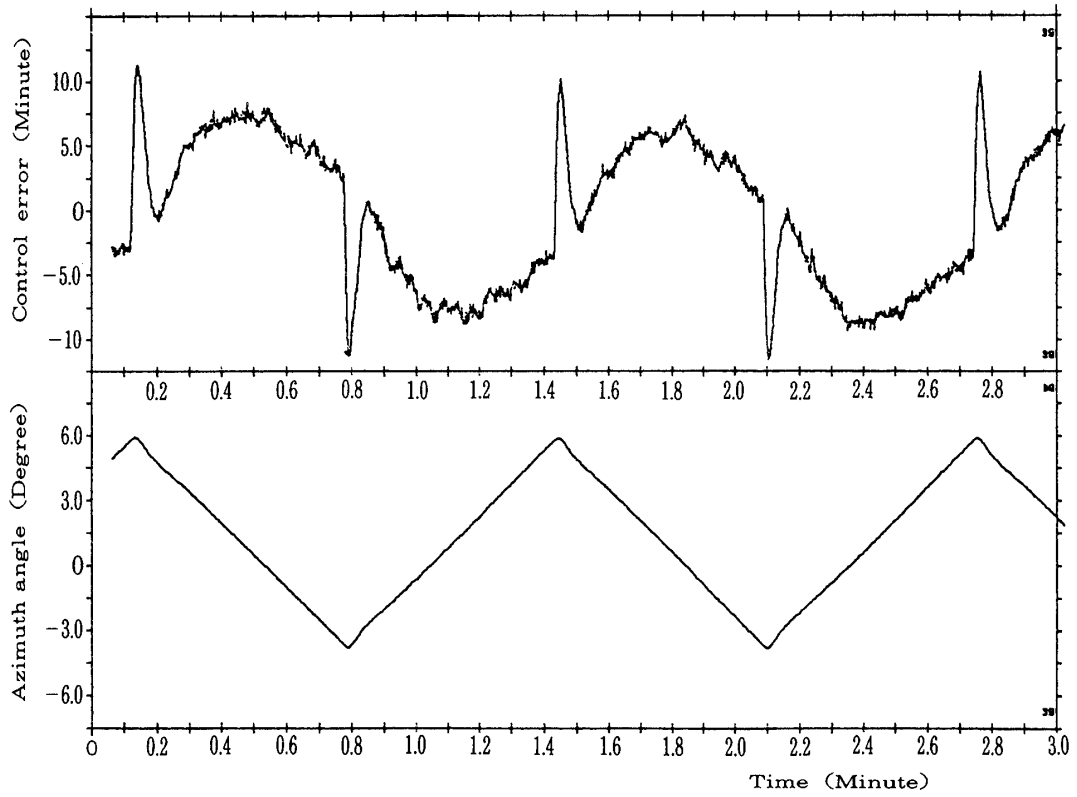


図10 フライト中の方位角制御例

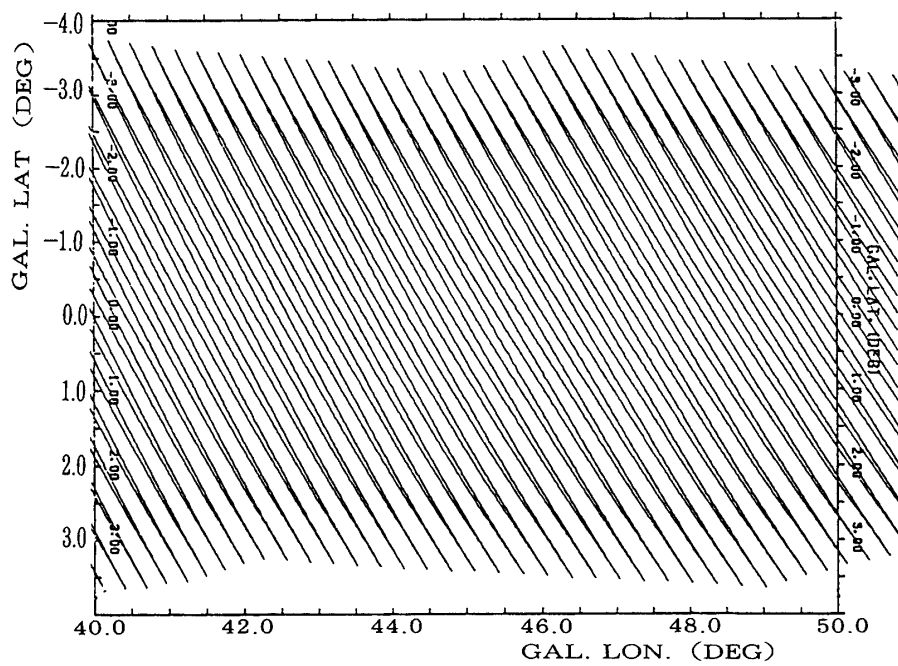


図11 銀河面のラスタースキャン例



16度角  $p-p$  と 8度角  $p-p$  の 2 種であり、三角波の周期はいずれも片側約 40 秒である。下段の波形は実際のゴンドラの回転角であり上段の波形は制御偏差、すなわち下段の信号より指令三角波信号を差し引いたものである。制御偏差はゲインを 20 倍に上げて拡大して記録している。ペンの相互位置がずれているが、制御偏差がインパルス的に大きくなっている部分が三角波の折り返し点の過渡応答である。波形より明かなように、過渡応答は 2~3 秒で終了し、制御偏差  $\pm 1$  分角以下に入っており、観測側の要求である、走査周期の  $1/10$  以下で目標制御精度内に入るという要件を満たしている。過渡応答が終了した後には一定速度で安定して方位角の走査を行っている。制御偏差のピークは 40 分角あるが、この実験では三角波の振幅が 30 度角と大きいので、4.2 のコンピュータシミュレーションの場合の振幅 8 度に換算すれば約 10 分角となり、シミュレーション結果とほぼ一致する。

#### 4.4 飛翔実験結果

この制御システムは宇宙科学研究所赤外線グループの観測器に搭載され、アメリカテキサス州パスタインにある気球基地 National Scientific Balloon Facility (NSBF) より、1991年 5月25日と 6月11日の 2回にわたり飛翔実験が行われた。気球はいずれも夕方に放球され、夜間観測が行われた。全飛翔期間にわたり、本制御システムは完全に動作し、三角波の指令信号に従い、ゴンドラの方位角を一定速度で正負に制御し、銀河面の走査を行った。なお、NSBF の気球放球では、スチールワイアを用いたラダー状の吊り紐を用いるため、その回転ばね定数  $k_r$  が大きいので、よりもどしモータにはリアクションホイール駆動とは別のモータを用いる方式とした。

結果の詳しい解析は現在観測チームにより進められているが、飛翔中の制御動作の一例を図 10 と図 11 に示す。図 10 は室内実験結果の図 9 に対応するものであって、波形 (a) は、磁気センサの出力であり、観測器の方位角の動きを示し、(b) は制御偏差である。過渡状態は室内実験と同様に 2~3 秒で収束している。制御偏差のピーク値は約  $\pm 10$  分角でコンピュータシミュレーション及び室内実験結果と符号しているが、過渡状態が終わった後も若干周期の長い変動が続き、定常状態での制御偏差は 4~5 分角程度と室内実験より大きくなっている。この原因は現段階ではっきりせず、今後引き続き詳しく検討することにしていく。ただこの偏差は、地磁気センサの出力を用いて補正可能であって観測への影響はほとんどなかった。

このシステムでは方位角一軸のみを制御しているが、銀河面は日周運動で仰角方向にも移動するので、両者を合わせて銀河面のラスター走査が行われる。その様子を示したものが図 11 である。概略等間隔で正しく走査がなされていることがわかる。走査波形の終端位置が変化している部分があるが、これはコマンドにより走査中心位置を徐々に変えたためである。

## 5. 終わりに

新型のリアクションホイールとして、長い腕の先端に錘をつけてフライホイールとし、その駆動機構を含めてゴンドラの頭部に取り付ける方式を開発した。従来のように大きな円盤状のホイールをゴンドラの中に搭載する必要がないため、ゴンドラの小型軽量化が図れるとともに、観測器のデザイン上の自由度も大きくなる。リアクションホイールの腕の長さは、放球に支障のない範囲で長くでき、かつ軽く作れるので大きな慣性モーメントを容易に得ることができる。試作した装置はそうした利点を十分発揮させることができた。

駆動モータとしては通常ギヤヘッド付きモータを使用した。ダイレクトドライブモータに比べ簡単に大きなトルク得られ、機構も簡単でコストの点でも有利である。当然、制御精度のみならず、応答速度も改善された。減速機構のバックラッシュや摩擦の影響は理論的には存在するものの、1分角程度の制御精度を実現する上ではその影響は見られなかった。

リアクションホイール制御方式では、吊り紐のねじれを取り除くデカップリング機構が必要になる。ここでは、制御機構を簡単にするため、吊り紐を回転させるモータを別に設けず、リアクションホイール駆動モータの出力を減速比を変えて用いる方式も試みた。こうした簡便な方法では、制御が定常状態になり、制御偏差が零となってもリアクションホイールに一定の周期的に正負に回転する変動成分が残る。しかし、吊り紐の回転ばね定数が十分小さく、気球の回転等で発生する外乱も小さければ、残留成分は実用上十分問題のない小さい量となる。そうした制御偏差量の見積を、制御系の解析と外乱量の推定から明らかにした。この解析は同時に、制御開始から線形制御領域に入り、以後線形制御を続けられるか否かを判定する方法を示すことにもなっている。線形領域での制御特性は、一般の制御系の解析と同様の手法で行うことができるが、今回この制御システムが赤外観測で、ゴンドラを一定測定で往復させる天空の走査を行うため、ランプ入力が増加した場合の応答特性を特に示した。ここでは走査が反転する際の過渡応答時間をできるだけ短くしたいと要求された。この制御方式では、リアクションホイールの慣性モーメントを大きくできることと、駆動モータのトルクも大きくできるので、この過渡応答時間は十分短くでき、観測の要求に答えることができた。

この制御システムは、1991年の春にアメリカで行われた2回の観測実験で使用され、全観測時間にわたり、完全に動作した。詳しい解析は準備中であるが、動作の概要を示した。その使用実績からも、今後方向制御を必要とする気球観測で、本制御方式が有効に利用できることが明らかになったと考える。

#### 参 考 文 献

- [1] 広本, 他, 1982: リアクション・ホイールによる気球赤外望遠鏡の姿勢制御, 宇宙研報告特集4号.
- [2] 粕, 他, 1984: リアクションホイールによる姿勢制御, 宇宙研報告特集11号.