

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

廣本宣久*・舞原俊憲*・水谷耕平*・奥田治之・芝井 広

(1982年6月18日受理)

A Reaction Wheel-Based Attitude Control System for a Balloon-Borne Infrared Telescope

By

Norihisa HIROMOTO Toshinori MAIHARA Kohei MIZUTANI
Haruyuki OKUDA and Hiroshi SHIBAI

Abstract: We have developed a reaction wheel-based azimuth stabilization system which enables accurate attitude control of a balloon-borne infrared telescope. The system utilizes the reactive effect of movement of a flywheel which is driven by a direct-drive torque motor, thereby controlling the azimuthal direction of a balloon gondola. In an actual flight test, the stabilization better than one arcmin has been attained for several maneuvering modes of observation referring to a geomagnetic aspect sensor.

概 要

気球搭載赤外線望遠鏡の高精度姿勢制御を行うために、リアクション・ホイールを用いた気球用ゴンドラのアジマス角安定装置を開発した。この装置は、ダイレクト・ドライブのトルクモータによって一定の慣性能率を有するホイールに角加速度を発生することにより、そのリアクションでゴンドラ自身の方向を制御する。実際の気球飛揚実験では、地磁気センサを基準としてアジマス角に対する幾つかの観測モードを試みた結果、約1分角以内の安定性を保つことが示された。

1. はじめに

気球から吊り下げられたゴンドラ内の望遠鏡で、天球面上の様々な方向を観測するためには、最低2つの独立な軸回りの回転角位置制御を行わなければならない。1軸は重力方

* 京都大学理学部

向の鉛直軸に、もう1軸を水平軸にとる経緯儀タイプが構造的には最もシンプルでよく用いられる方式である。このうち水平軸回りの仰角は、ゴンドラの振り子運動を無視できる場合は、ゴンドラの床面を基準として定義され、その制御は非常に単純化できるが、鉛直軸回りの方位角は力学的な基準は何ら無いため、方位角を検出する何らかのセンサを基準にしたダイナミックなサーボ機構を伴った位置制御が不可欠となる。

これまで我々の銀河赤外線気球観測では、宇宙研で開発されたより戻し方向規正の制御方式が使われてきた [1] [2]。この方法は、気球とゴンドラ間の吊りひもの途中のより戻しモータの回転によって、ゴンドラの方位を一定に保つようサーボ駆動させるものである [3]。従ってモータの回転は吊りひものよじれのトルクを通じてゴンドラに伝えられるので、気球自身やゴンドラの比較的速い乱れに追従しにくい、通常のレベルライトの条件のもとで 1° 以内の安定性が容易に得られている。

一方、矢島他 [4] は比較的大型気球望遠鏡の高精度追尾を実現するため、コントロール・モーメント・ジャイロ (CMG) と吊りひものよじれを除くためのよじれ戻し機構を結合させて、通常状態で $5'$ 以下程度の鏡筒の方向制御偏差を得ている。スターセンサによる精制御で最終的には $5''$ 以下の追尾精度が実現されている。この方法は CMG という高トルク発生機構を備えているので、大型装置でもかなり速い応答性を与えられるが、複雑な高速ジャイロ機構が必要で比較的小型の望遠鏡を搭載するゴンドラの方向規正装置としては採用しにくい点もある。

我々は今回、口径 20 cm の比較的小型の赤外線望遠鏡による銀河赤外線偏光観測を計画し、 0.4° のビームでの安定な測定を行うため、リアクション・ホイールを用いた方位角制御装置を開発した。この方法は、ゴンドラ中に固定したトルクモータ駆動軸に一定の慣性モーメントを有する円板を装着し、この円板を回転させる反動としてゴンドラを回転するトルクを得るものである。このリアクション・ホイールによる方向規正は、外国の幾つかの気球望遠鏡の方向規正のためのトルク源として用いられているが、通常吊りひものよじれの効果を除くために、水銀軸受が使われている [5] [6]。我々はそれに対して、従来より戻し方向規正で使われるモータを吊りひものよじれを除くための、一種のアクティブな軸受として利用し、これをリアクション・ホイールと結合することによって、シンプルな方位角制御の方法を得た。実際に、1981年5月の飛揚実験では、気球高度においてこの方法に基づく各種の制御モードを実施し、約 $1'$ 以下の安定度を実現していることがわかった。以下に、より戻しモータとリアクション・ホイールを結合したアジマス制御装置の原理と実際の設計及び得られた性能について報告する。

2. 我々の採用したリアクション・ホイール使用の方向規正装置の概要

観測に必要な方向規正の精度としては、測光観測装置のビーム・サイズよりも十分に小さな角度安定性を保たなければならないという要請によって決まる。従って我々の場合、 0.4° のビームに対して安定度は $0.1'$ 以下が必要で、出来れば $\pm 1'$ 程度の安定度を実現することを目標とした。

リアクション・ホイールのゴンドラ内での位置としては図1に示すように、全体の重心に

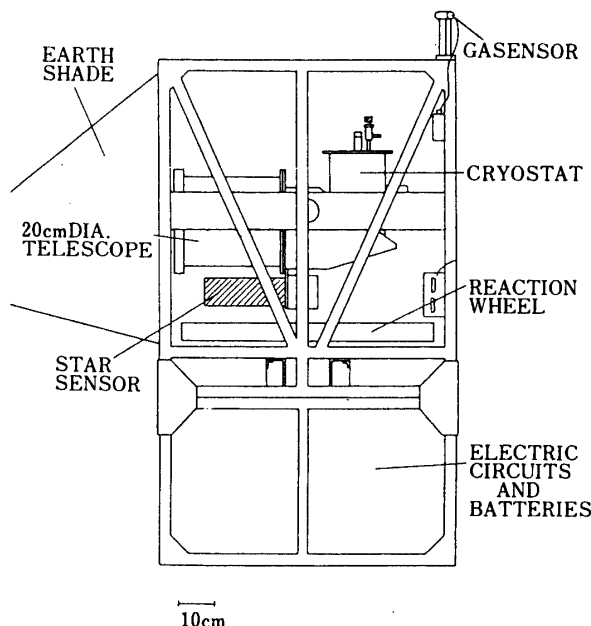


図1 リアクション・ホイールによる姿勢制御システムを搭載した気球赤外線望遠鏡のゴンドラ

近い場所に設定し、ゴンドラの振り子運動とのカップリングがシンプルになるようにした。ゴンドラの方角姿勢の検出には地磁気センサ(GA)を用いて、この信号をリアクション・ホイール駆動のトルクモータに加えることによりゴンドラの姿勢はGA出力ゼロの方向にロックされる。実際には、GAの出力に何らかの可変オフセット電圧を重畳することにより、後に述べるような各種の観測モードを行う。このように、ゴンドラの姿勢は直接的にはトルクモータによって制御されるが、そのままでは吊りひものよじれの結果ホイールの回転数の発散が起ってしまう。これを避けるため、我々はホイールの回転軸に取付けたタコジェネレータの信号を、より戻しモータにフィードバックして駆動し、つりひものよじれのトルクを加えることにより、ホイールの回転数の一方的な増加を抑える方法をとった。更に、この制御が行われている間にホイールの回転数がゼロの状態を通過し、大きな静止摩擦の効果によって、規正精度が悪くなることのないように、上記のより戻しモータのフィードバック回路にオフセット電圧を加えておいてホイールの回転が平均的に一定の回転数を保つように制御する。この回転によるモータの逆起電圧はモータに加える信号電圧よりも十分に小さい必要がある。我々はこの逆起電力によってトルクモータの発生するトルクが損失しないように、トルク・モータを電流制御で駆動している。

このシステムの基本となるリアクション・ホイール回転装置の構造図を図2に示す。ホイールの材質はジュラルミンで直径68cm、外縁部の幅5.5cmのリング状の部分の厚くなっており、この部分で慣性モーメントの84%を占めている。質量は22kg、慣性モーメントは $1.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ であり、今回の気球実験に用いるゴンドラ全体の慣性モーメントの約11%になる。

トルクモータはINLAND社のT-2967を採用した。トルクモータの選択で重要なパラ

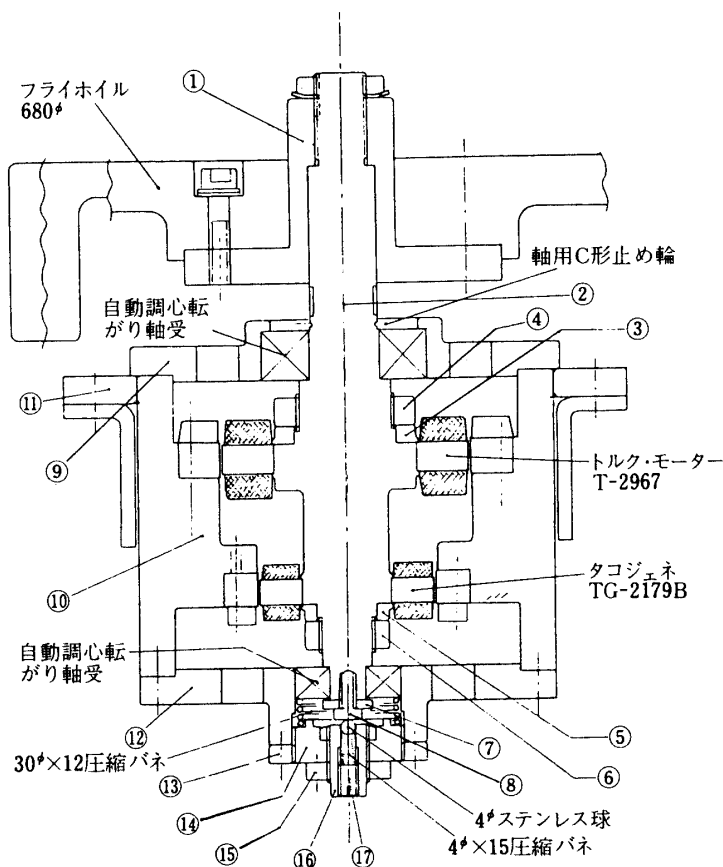


図2 リアクション・ホイール駆動部分の組立図

メータは、ピークトルク T_p 、ブラシによる摩擦トルク T_f 、リップルトルク T_r 、及び最高回転数 f_{max} である。 T_p は、ゴンドラが追従できる運動の速度の上限を決める。従って大きいほど有利であるが、細かい角度の精密な制御を目的とするシステムでは T_p の大きなモデルは T_f や T_r も大きくなるため、あまり T_p は大きくするのは得策ではない。又、使用できる駆動回路の電流容量からも制限される。

タコジェネレータは、トルクモータと同じ INLAND 社の TG-2179 B を使った。感度は 3.8 V/rps 、最大回転数は約 20 rps である。今回の方向規正システムでは、約 0.073 rps の平均回転数の回りでリアクション制御が行われるように、次に述べるより戻しモータにこの信号が加えられる。写真1に、ホイール回転装置のハウジングに取付けられたトルクモータとタコジェネレータの様子を示す。

より戻しモータは従来のより戻し方向規正で使用されているものと同じもので、定格回転数 2.5 rpm 、回転速度の印加電圧に対する比感度は 0.21 rpm/V となっている。より戻しモータの回転によってゴンドラに与えられるトルクは、吊りひものよじれを通じて伝えられ、その大きさは自由回転周期によって次のように表わすことができる。

$$T_{tw} = I_0 \omega_0^2 \Delta\theta$$

ここで、 I_0 はゴンドラの慣性能率、 $\Delta\theta$ はひものよじれ角、 ω_0 は自由回転周期 P_0 と、 $\omega_0 =$

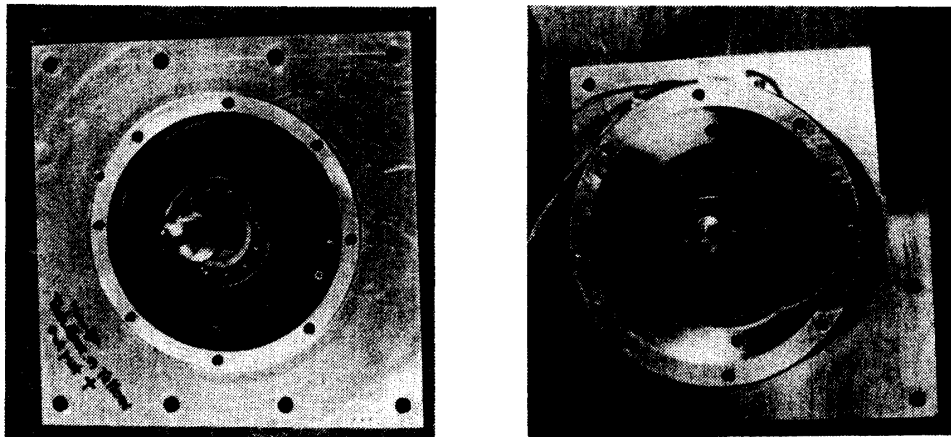


写真1 トルクモータ(a)とタコジェネレーター(b)の取付状態を示す。

表1. 方向規正システム構成要素の性能の定数

構成要素	項目	性能の定数
リアクション・ホイール	(1)慣性モーメント I_R	$1.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
	(2)ホイールとゴンドラの慣性モーメント比 J $\left(J = \frac{I_R}{I_o}\right)$	0.11
トルクモータ (T-2967)	(1)ピークトルク T_P	$0.76 \text{ N}\cdot\text{m}$
	(2)トルクセンシティブィティ K_T	$0.28 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$
	(3)最大回転数	900 rpm
タコジェネレーター (TG-2179B)	(1)電圧センシティブィティ S_V	$0.61 \text{ V}(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$
	(2)最大回転速度 ω_{\max}	$125 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$
より戻しモータ	(1)速度センシティブィティ K_V	$0.022 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$
	(2)定格回転速度 ω_{tw}	$0.26 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$
吊ひも	(1)自由回転周期 P_o	60 sec
	(2)自由回転速度 ω_o	$0.105 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$

$2\pi/P_o$ の関係で結ばれる。この吊りひものよじれによるトルクがリアクション・ホイールの発生するトルクに比して十分小さくなるように、 P_o を約60秒にした。

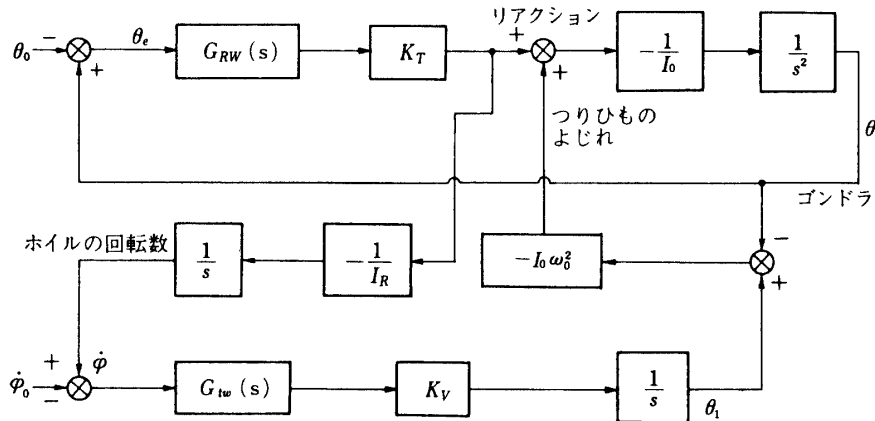
以上、この節で述べた今回のリアクション・ホイールを用いた方向規正における重要な幾つかの定数を表1にまとめておく。

3. 制御系の定式化と制御回路

前節で述べたように、ゴンドラの方角はリアクション・ホイールの回転力によって生じる反作用のトルクと、より戻しモータで生じる吊りひものよじれのトルクによって制御さ

れる。制御の道筋をブロック線図に表わすと、図3のように書くことができる。

目標の方位角 θ_0 と、その時の実際の方位角 θ との差の誤差信号 θ_e が、リアクション・ホイール制御回路 $G_{RW}(s)$ を通してトルクモータに加えられ、 θ_e が0に近づくようゴンドラが動かされる。ゴンドラには更に、吊りひものよじれのトルクも加わる。実際には、ホイールが静止する点の前後では駆動電流が小さい領域で静止摩擦トルクによって、制御のきかないデッドゾーンが生じてしまうので、デッドゾーンをなくすためにリアクション・ホイールは基準回転数 $\dot{\phi}_0$ を保つようにした。従ってより戻しモータには、ホイール回転数 $\dot{\phi}$ と $\dot{\phi}_0$ の差が制御回路 $G_{tw}(s)$ を通して与えられている。



θ_0 : 目標の方位角

θ : ゴンドラの方位角

θ_e : 方位角誤差信号

$\dot{\phi}_0$: ホイールの基準回転数

$\dot{\phi}$: ホイールの回転数

$G_{RW}(s)$: リアクション・ホイール制御回路

$G_{tw}(s)$: より戻しモータ制御回路

s : ラプラス変換の変数

K_T : トルク・モータの電流-トルク感度

K_V : より戻しモータの電圧-回転速度感度

I_0 : ゴンドラの慣性モーメント

I_R : リアクション・ホイールの慣性モーメント

ω_0 : ゴンドラのつりひもによる自由回転運動の角速度

図3 リアクション・ホイールとより戻しの結合した系のブロック線図

次にホイールの回転とより戻しモータの回転を制御する2つのサーボ回路 $G_{RW}(s)$ と $G_{tw}(s)$ の形について考える。誤差信号に比例する項だけでは、復元力として働くが振動を続けてしまう。そのため微分項を加えてダンピングさせ制御系の安定を図ることが必要である。従って制御回路として最も簡単なものは次のような表式で表わされるものになる。

$$G_{RW}(s) \propto b + as \quad (1)$$

$$G_{tw}(s) \propto B + As \quad (2)$$

以上のような制御系を実際のリアルな座標系の表現で定式化すると、ゴンドラ、ホイール、及びより戻しモータの目標の方位角方向からのずれの回転角 θ , φ , 及び θ_1 に対する運動方程式はそれぞれ、

$$\ddot{\theta} = -J\ddot{\phi} - \omega_0^2(\theta - \theta_1) \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = a\dot{\theta} + b\theta \quad (4)$$

$$\dot{\theta}_1 = -A\dot{\phi} - B\phi \quad (5)$$

と書くことができる。これは、西村[5]の考察で示されたものとは、 θ_1 についての式の右辺第一項に差がある。我々の式は、ホイルの回転のみに依存したより戻しモータ制御を行っていることを示しているのに対して、西村達の場合は、吊りひものよじれ角自身を減らす項に置きかわっているが、実際の運動はほぼ等しくなることが示されている[6]。

(3), (4), (5)式中で、 J はホイルとゴンドラの慣性モーメントの比で I_R/I_0 であり、 ω_0 は既に述べたようにつりひものよじりのトルクの強さを表わす定数である。その他の定数 a, b, A および B は、装置と制御回路によって決まる定数である。例えば、ゴンドラの方位角方向のずれに対する復元力の係数である b は、 GA からの出力信号の方位角に対する感度 S (V/rad), 制御回路のゲイン G_θ , パワー回路の電圧-電流変換比 P (A/V), トルク・モータの電流トルク定数 K_T (N·m/A), およびホイルの慣性モーメント I_R (kg·m²)を用いて、

$$b = S \cdot G_\theta \cdot P \cdot \frac{K_T}{I_R} \quad (5)$$

と表わされる。 S, K_T および I_R は GA センサ, トルク・モータおよびホイルによって決まり、用いる装置によって固定した値をとるので、特定の b の値を定めることは、制御回路のゲイン $G_\theta \cdot P$ を定めることに対応する。逆に、制御回路のゲインの定数をどう決めるかという問題は、(3), (4), (5)式を考察して、良い方向規正を与える適当な定数 a, b, A および B を求めることによって答えを出すことができる。

まず(3)式の右辺第2項を無視してリアクション・ホイルのみの制御によるゴンドラの運動を考えて、定数 a および b を定める。つりひものよじれのトルクをリアクション・ホイルの発生するトルクに対して十分小さくすることは、つりひもの長さを長くすることによって簡単に実現できる。実際、表1に上げた条件でも、トルク・モータのピークトルクと同じだけのトルクをつりひものよじれで発生させには、 $\theta - \theta_1$ が 180° 近くも必要である。(3)式の第2項を無視すると、ゴンドラの方位角の運動方程式は、

$$\ddot{\theta} = -Ja\dot{\theta} - Jb\theta \quad (6)$$

となり減衰振動の方程式となる。但しトルク・モータが発生するトルクには最大値があるので、(6)式の右辺の絶対値は T_p/I_0 を越えることはできない。ゴンドラの方位角が目標とする方位角からずれたときに、もとの位置まで復元するのに要する最小時間は(6)式の減衰項を無視して、 $t = \pi/2\sqrt{Jb}$ となる。この時間として、0.1秒程度の速さを要求すると、 $b \approx 2.5 \times 10^3 \text{ sec}^{-2}$ が必要になる。このとき、角度のずれによって、トルク・モータの発生するトルクがサチる角度範囲は、 $T_p/I_R b$ で表わされ、 0.01° になる。

(6)式より求められる最も速い減衰運動を与える条件は

$$(Ja)^2 = 4Jb \quad (7)$$

であるが、減衰力を表わす係数 a を(7)で与えられる値よりも大きく採ることによって、制御系の安定性を増すことができ、また、階段状の信号電圧を GA 信号に重畳してスキャンを行なわせる場合、ゴンドラを一様な速度でなめらかに動かすことが可能になる。我々は a の値を $6.6 \times 10^3 \text{ sec}^{-1}$ にしている。これらは、かなり大きい値であるが、これは我々が、速い速度の外乱に対応できる速い制御を重視したからである。

より戻しモータの制御定数 A, B は、より戻しモータとホイールの回転のカップリングした運動の時定数が、リアクション・ホイールによるゴンドラの方角制御の時定数よりも十分遅く、方向制御の妨害をしないという条件から、

$$A \ll \frac{J^2}{\omega_0^2} a, \quad B \ll \frac{J^2}{\omega_0^2} b \quad (8)$$

を満たす必要がある。実際、この条件が成り立つ限り、 A, B がゴンドラの運動にほとんど影響を与えないことは、(3), (4), (5)の方程式を数値的に解くことによっても、確かめることができる。

図4(a), (b)に、 $J=0.1, \omega_0=0.116 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 、トルク・モータのピークトルクに対応して $\dot{\varphi}$ の最大値を $0.41 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$ 、より戻しモータの最大回転数を $0.3 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ として、初期条件 $\theta(0)=1^\circ, \dot{\theta}(0)=\dot{\varphi}(0)=0 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}, \theta_1=0^\circ$ の場合の数値計算結果を示す。

結果の特徴は、ゴンドラの運動 ($\theta(t)$) に関する限り、リアクション・ホイールを駆動するトルクモータの制御の定数 a 及び b によってふるまいが決まっていることである。我々は A, B の値として、それぞれ 0.05 sec および 0.18 を採った。 A を小さくしたのは、ゴンドラの速い回転運動の際に、誘発されるより戻しモータの、運動を妨げる向きの回転を押さえるためである。表2に採用した制御回路の定数をまとめる。

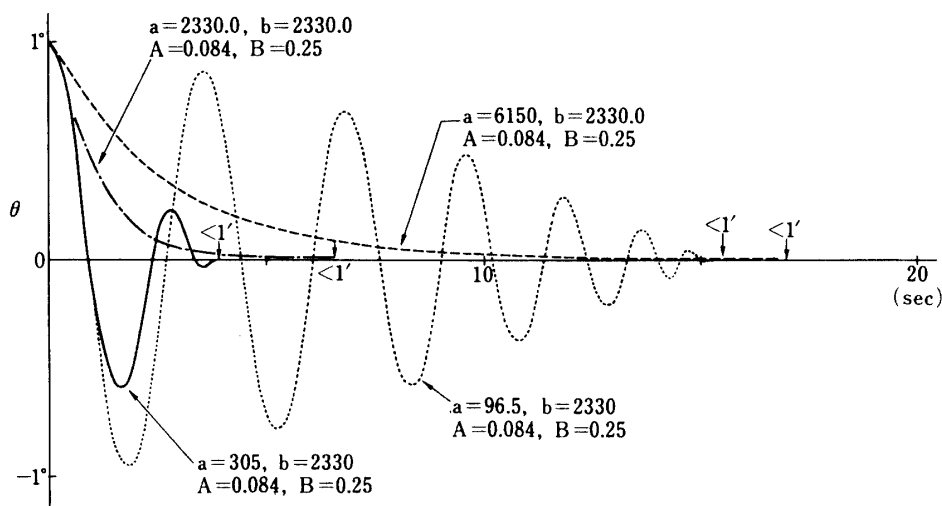


図4 (a) ゴンドラの運動 ($\theta(t)$) の数値解の例
 A, B を固定して、 a, b を変化させた場合

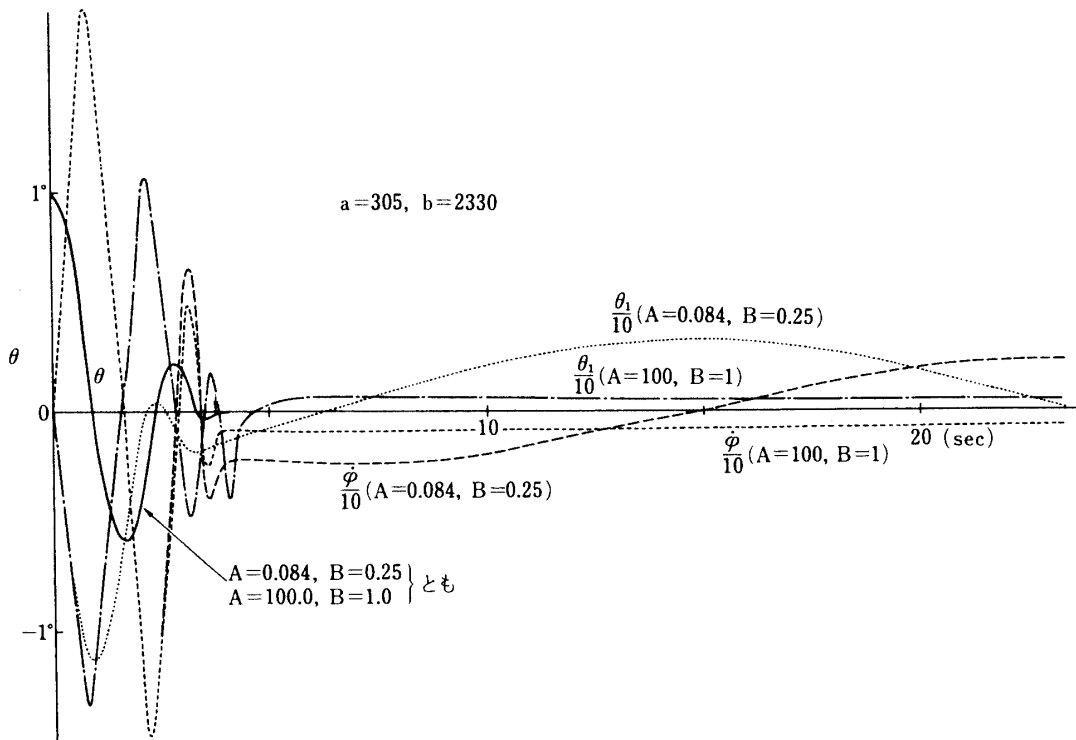
(b) a, b を固定して A, B を変化させた場合

表2. 制御回路の定数

	パラメータ	我々の定数
リアクション・ホイール	a	$6.6 \times 10^3 \text{ sec}^{-1}$
	b	$2.5 \times 10^3 \text{ sec}^{-2}$
より戻しモータ	A	0.05 sec
	B	0.18

4. 飛揚実験による結果

今回我々の開発したリアクション・ホイールによる方向規正装置は、気球による銀河面の近赤外偏光観測のために1981年6月3日、宇宙科学研究所の三陸大気球観測所からB₁₅型気球に搭載して飛揚実験が行われた。観測装置及び観測自身の概要については廣本他(1981)を参照されたい[7]。

ここでは、観測時に行われた各種のモードの方向規正で実際に達成された性能について報告する。

方位角の姿勢の検出には地磁気センサ(GAセンサ)を用いた。GAセンサは、約10kHzの励振周波数を持つフラックス・ゲート式の磁力計で、分解能は数秒角のオーダーまで十分可能であるが、我々の今回の実験では、PCM伝送の分解能で制約を受け、読み取りは1

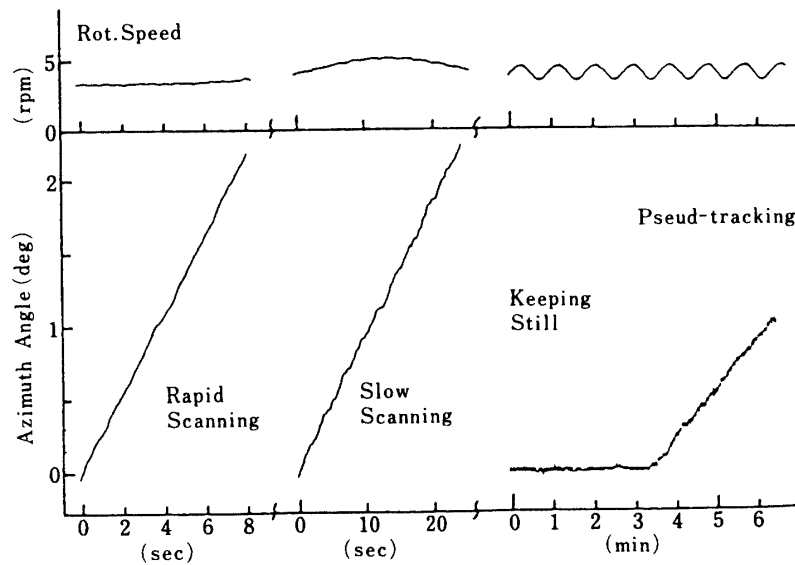


図5 速いスキャン，遅いスキャン，静止および擬トラッキング（日周運動に近い速度での移動）時のホイールの回転速度（上）と方位角（下）のプロファイル

分角程度となった。基本的な方位角ロックのモードでは、PCM 伝送のための AD 変換の最小ビットのゆらぎ以内となり（図5 参照），その場合の規正精度は $\pm 1'$ 以内が達成されていることがわかる。又，比較的早いスキャン・モード，遅いスキャン・モード及び擬トラッキング・モードのそれぞれにおいても，規正のゆらぎはほぼ $\pm 1'$ 以内におさまっている。

ホイールの回転速度を同図に示したが，静止摩擦の問題になる速度ゼロの点を切ることなく，いずれのモードでも約 4 rpm のまわりで ± 1.2 rpm の幅の周期的な動きが行われていることがわかる。より戻しモータを駆動する制御回路は，ホイールの回転数とその微係数だけの演算回路で構成されているので，回転数のゆらぎの幅を小さくするためには，外乱が他にないときには，ゴンドラに加わる吊りひものよじれのトルクを小さくすることが必要であり，そのためには，つりひもの長さを長くすればよい。しかし，いずれにせよ，ゴンドラの方角規正精度は，リアクション・ホイールの制御だけで決まっているので，吊りひものよじれトルクの効果は無視してよいと考えられる。

5. ま と め

我々は，リアクション・ホイールとより戻しモータによる吊りひものよじれを除く機能を結びつけた新しい方位角制御の方角規正システムを開発し，実際の赤外線観測を目的とした気球飛揚実験を行った。このシステムは，赤外線望遠鏡を含むゴンドラ全体の慣性モーメントの約 9 分の 1 のモーメントをもつフライ・ホイールを，ダイレクトドライブのトルクモータでサーボ制御を行うもので，方位角の検出には GA センサを用いた。吊りひものよじれを除くために，従来のより戻し方角規正と同じ機構を使って，リアクション・ホイールの回転速度の増加を抑える制御を行う。

実際の飛揚実験では，各種のスキャン動作や静止のモードにおいて，指向性のゆらぎは

±1'以内に入っていることが確かめられ、目標とした方向規正精度が達成されていることがわかった。

参 考 文 献

- [1] 舞原俊憲・小田直樹・杉山卓也・奥田治之, 1978, 宇宙航空研究所報告, 14, 921.
- [2] 小田直樹・奥田治之・舞原俊憲, 1979, 宇宙航空研究所報告, 15, 331.
- [3] 西村純他, 1970, 宇宙航空研究所報告, 6, 249.
- [4] 矢島信之, 1981, 大気球シンポジウム集録, p. 276.
- [5] 西村純, 1981, 大気球シンポジウム集録, p. 50.
- [6] 西村純・大田茂雄・粕 豊, 1981, 大気球シンポジウム集録, p. 35.