

リアクションホイールによる姿勢制御

粕 豊・太田 茂雄・西村 純

(1984年5月10日受理)

Attitude Control Systems for Balloon Borne Telescope by Using a Reaction Wheel

By

Jun NISHIMURA, Yutaka KOMA and Shigeo OHTA

Abstract: For a precise attitude control for a balloon borne telescope, a system was developed by using a reaction wheel. The system has also an active bearing to avoid the balloon and gondola. The motion of the gondola during this control is fully analyzed to find the most appropriate parameters to the reaction wheel and the achieve bearing.

This attitude control system was applied to the balloon borne telescope to observe the dust ring around the sun at the time of eclipse occurred in Indonesia on June 11, 1983, and achieved the pointing accuracy of several arc second.

1. まえがき

気球搭載の観測器の姿勢制御には従来“よりもどし姿勢制御方式”[1]がしばしば使われてきた。この方式は簡便であると同時に経費をあまり必要としない利点をもっているが、指向精度は約1度角で、目的によっては不十分な感をまぬがれない。

たまたま昭和58年の6月11日にジャワ島で皆既日食があり、その機会に太陽のFコロナを気球を使って観測することが計画された。目標とする指向精度は1分角以内であるため、これまで京都大学や宇宙研で開発をつづけてきた“リアクションホイール”による姿勢制御方式を採用することにした。まず解析的な方法で十分な検討を行い、ついで計算機によりシュミレーション計算を行った。この方式に必目な各種パラメーターについて最適

値を推定し、ついでテストベンチを用意して試験を行った。結果は上記解析の結論とよく一致しており、“リアクションホイール”方式についての設計指針が解析的に十分把握されたものと考えている。

実際の日食時の観測時には±数秒角の精度を得て目的とするFコロナの観測に成功することが出来た。今後この方式の軽量化、簡便化を行い、精密な制御を必要とする観測に応用して行きたいと考えている。

2. 制御のシステム

リアクションホイールによる制御システムは図1に示すようなものである。気球からの吊紐のトルクを避けるために吊紐の間に小型モーターを入れてある。このモーターはアクティブなベアリングとして動作すると同時にリアクションホイールのアンローディングの役割を果たしている。

ゴンドラの指定方向からの誤差角	: θ
ホイールの指定方向からの回転角	: φ
小型モーター軸の指定方向からの回転角	: θ_1
ホイールとゴンドラの慣性能率比	: J

とし、吊紐によるゴンドラの自由回転振動の角周波数を w_0 とする。

ゴンドラの運動方程式は

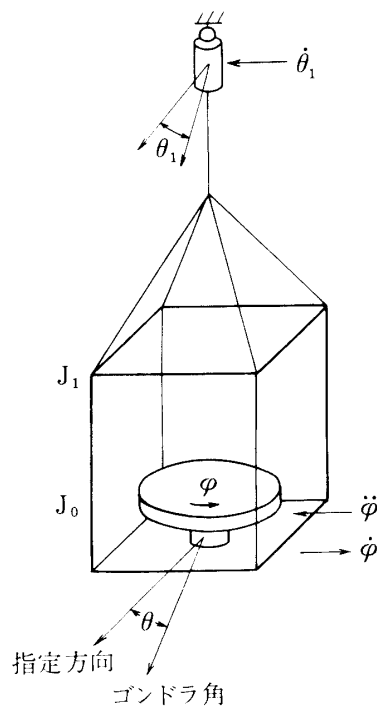


図1 リアクションホイールによる姿勢制御の構成

$$\ddot{\theta} = J\ddot{\varphi} - w_0^2(\theta - \theta_1) \quad (1)$$

となる。ホイールの駆動電流として(1)式で θ が収斂するための条件を考慮して

$$\ddot{\varphi} = a\dot{\theta} + b\theta \quad (2)$$

とする。

小型モーターの軸角 θ_1 に対しては、吊紐のトルクがなくなるようにモーターを駆動すればよい、つまり

$$\theta_1 = -A \times (\text{トルク})$$

となるような電圧をかけることにする。吊紐のトルクは $-w_0^2(\theta - \theta_1)$ であり、この量は(1)、(2)式から

$$-w_0^2(\theta - \theta_1) = \ddot{\theta} + J\ddot{\varphi} = \ddot{\theta} + a\dot{\theta} + a\theta \quad (3)$$

であるから、 θ_1 としては

$$\theta_1 = -A(\ddot{\theta} + Ja\dot{\theta} + Jb\theta) \quad (4)$$

とすればよい。なおこのモーターにホイールのアンローディングの役割りをもたせるため $-B\dot{\varphi}$ の項を加え

$$\theta_1 = -A(\ddot{\theta} + Ja\dot{\theta} + Jb\theta) - B\dot{\varphi} \quad (5)$$

ととく[2]。

(1)式中の $\ddot{\varphi}$ 、 θ_1 を(2)、(5)式を使って消去し、 θ についての微分方程式を導くと、(5)式中の $\ddot{\theta}$ 、 $\dot{\theta}$ の項は無視できることがわかる。そこで、 $AJb\theta$ を改めて $C\theta$ とおくと(5)式は

$$\dot{\theta}_1 = -C\theta - B\dot{\varphi} \quad (6)$$

となり、 θ についての微分方程式として

$$\theta + Ja\dot{\theta} + (Jb + w_0^2)\ddot{\theta} + w_0^2(Ba + C)\theta + w_0^2Bb = 0 \quad (7)$$

を得る。

3. 微分方程式の解について

(7)式は4次の微分方程式であるのでいきなり解くのは得策ではない。またその物理的内容も把握しにくい。一般に吊紐によるゴンドラの自由振動周期は長く、3~4分程度のものである。従って w_0^2 としては

$$w_0^2 = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cong 10^{-3}$$

程度の値となっている。(7)式で $w_0^2 \ll 1$ の近似が成立つ。

$w_0^2 \ll 1$ の場合(7)式は十分な近似で次の2つの微分方程式に分離することができる。

$$\ddot{\theta} + Ja\dot{\theta} + Jb = 0 \quad \text{根 } \alpha_1 \quad \beta \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{w_0^2 C}{Jb} \dot{\theta} + \frac{w_0^2 B}{J} \theta = 0 \quad \text{根 } \gamma_1 \quad \delta_1 \quad (9)$$

運動方程式のこのような分離によって解析は著しく見通しのよいものとなり、一般の解は

$$\theta = H_0 e^{at} + H_1 e^{\beta t} + H_2 e^{\gamma t} + H_3 e^{\delta t} \quad (10)$$

であたえられる。(8)、(9)式から

$$a_1\beta \approx O(Ja), \quad \gamma_1\delta \approx 0\left(w_0^2 \frac{C}{Jb}\right)$$

であるので、 θ の運動としてはまず、 α, β の根に対応して急速に収斂し、ついで γ, δ の根によりゆるやかな減衰がおこることがわかる。

3-1 比例制御領域

比例制御領域では、上に述べた通り、 γ, δ の根に対応する $H_2eT + H_3e^{\delta t}$ が最終的に残る。この場合の減衰の時定数とは(9)式から

$$\frac{1}{\tau} \approx \frac{w_0^2 C}{2Jb}$$

で、 θ は

$$\theta \approx \frac{w_0^2 ac}{Jb^2} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{2}{\tau} \frac{a}{b} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

であたえられる。 τ が大きいと残留誤差角が小さくなるが減衰に時間がかかる。目標値に至る時間は主として Jb と c の比できまる。

外乱に対しては

$$\text{一様回転} : F(\text{rad/sec}) \quad \text{振動回転} : F_2 e^{i\omega t} (\text{rad/sec})$$

がある場合には残留角度 θr は

$$\theta r = \frac{w_0^2}{2Jb} (F_1 + F_2)$$

となるので、目標値に対して Jb の下限值がきまる。

3-2 on-off 領域

制御に入った最初は一般に θ, θ_1 の値が大きいので、この制御系は on-off 制御になっている。

それはリアクションホイールのモーターについて最大トルクがあるため

$$|a\dot{\theta} + b| \leq (\text{最大トルク}) / (\text{ホイール慣性能率}) \quad (11)$$

また吊紐中のモーターに対しては最大回転数があるため、

$$|\dot{\theta}_1| = |c\theta + B\phi| \leq \text{最大回転数} \quad (12)$$

の条件がつく。

収束条件を調べてみると

$$\begin{array}{ll} \alpha, \beta \text{の根に対応して} & a/b \\ \gamma, \delta \text{の根に対応して} & B/C \end{array}$$

の値に条件がつく。

3-3 最適パラメーター

以上の結果を総合して最適パラメーターを求めてみる。

まず、

- on-off 領域での収斂条件から $a/b \approx 1$
 $B/C \lesssim 10^{-3}$

- 外乱の寄与を下げるために $Jb > 1$
 - 比例制御領域での収斂条件から $C/Jb \leq 0.1$ 又は ≤ 6
- が得られる。

$J=1/30$ として、回路上の実現性を考慮して、1例として $a=100$ ととると、 $b \approx 100$, $C=100$, $B \approx 0.05$ が得られる。

このパラメータのもとにシュミレーションの結果を図2に示したが、解析的な解から得られる収斂状況と全く同じ形の答が得られていることが分った。

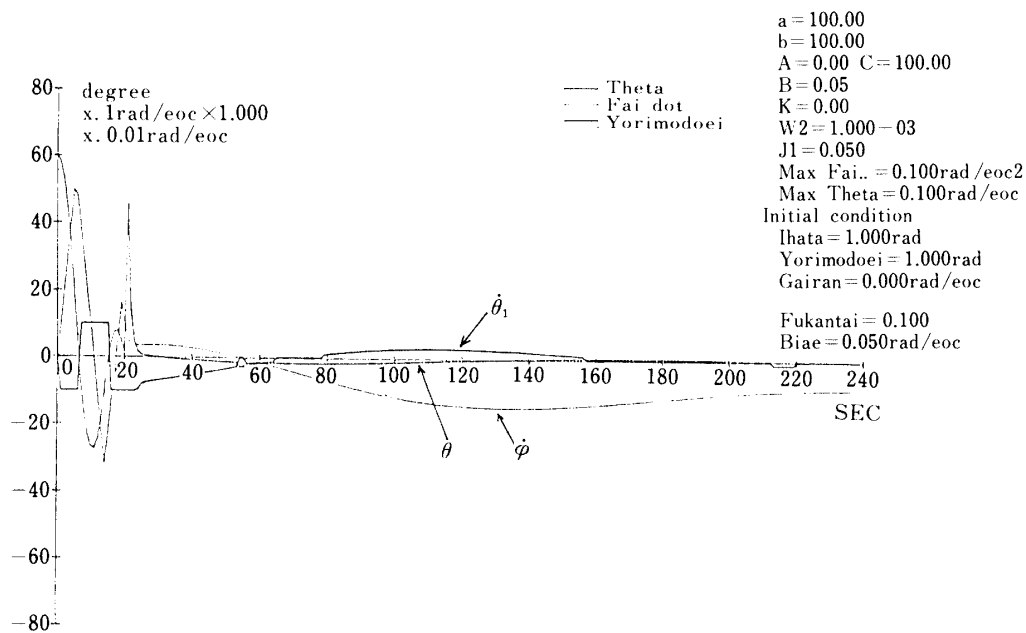


図2 シュミレーション

4. 実際の制御システム

リアクションホイールには直径 56 cm 重量 7.8 kg のアルミ製のホイールを使用した。慣性モーメントは $4,600 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ である。トルクモータには最大トルク $6 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ のダイレクトモータ (T-2967-D) を使用した。小型モータには回転数 2 rpm のものを使用し、観測器の自由回転周期は 120 秒とした。

回路では解析およびシュミレーションによって得られたパラメータを用いるために入力信号の大きさや出力信号の大きさを規格化した。例えばトルクモータへの出力回路では 1 V は $1 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ のトルクの発生を意味するようにし(2), (6)式をそのまま回路上に構成することができる。

5. 結 果

5-1 テストベンチによる結果

解析によって得られたパラメータを用いてテストベンチによる方向規正の実験を行った。センサーにはGAを用い、ゴンドラとフライホイールの慣性モーメント比は $J=1/20$ である。図3にその結果を示す。 θ は目標値からのずれ角(度)、 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\theta}_1$ はフライホイールおよび小型モータの回転速度(回転/分)である。実験室内における地磁気環境の悪さのために大きなノイズが現われているが、ほぼ1分角の姿勢精度が得られ、解析およびシミュレーションとよく一致し、この方法が有効であることを確めた。

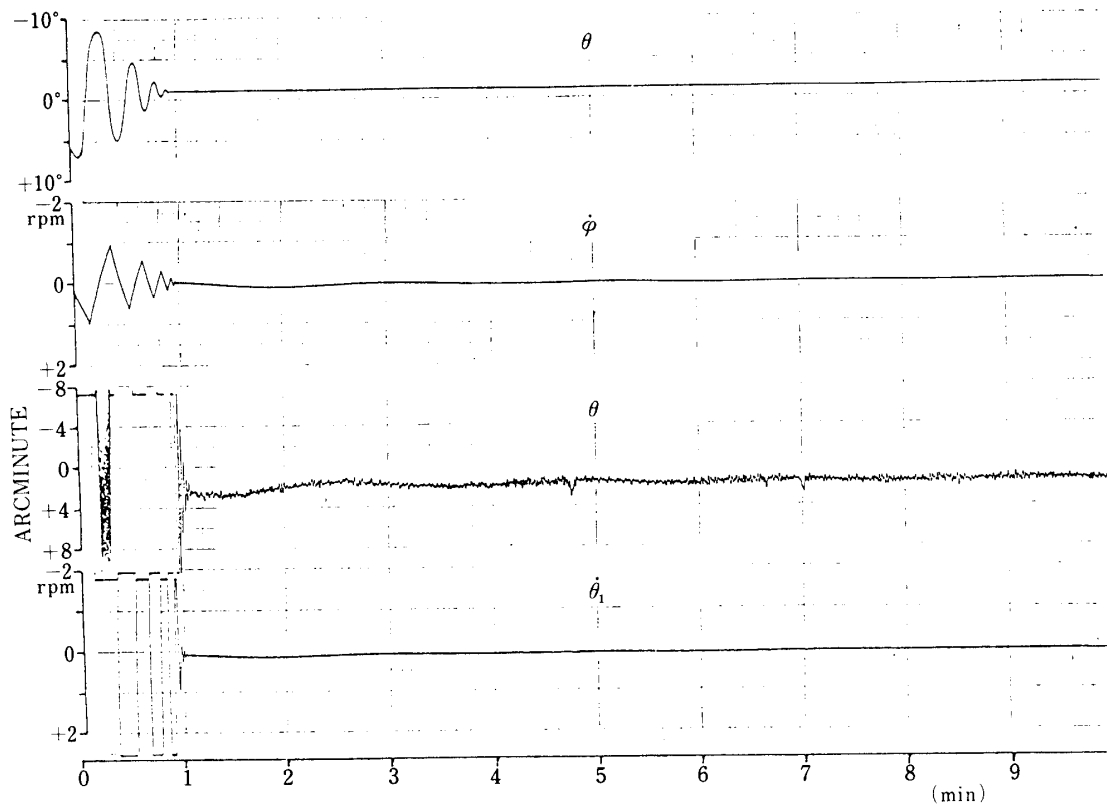


図3 テストベンチによる姿勢制御結果

5-2 インドネシア日食観測による結果

指定方向を与えるセンサーとしてターンテーブルに取りつけたGAを用いた。これは日食中の太陽を目標とすることが困難なためである。姿勢の決定にはSITカメラの画像を見ながらリモートコントロールを行った。図4に制御ONした直後を示した。2分後に ~ 10 秒角に収斂している。図5に日食観測中の誤差角を示す。GAは太陽の運動に合わせて回転しているので、ここに表われた信号は目標値からのずれ角となる。図6に誤差角の頻度分布

を示す。ほぼガウス分布をしており 1σ の値は 8 秒角である。

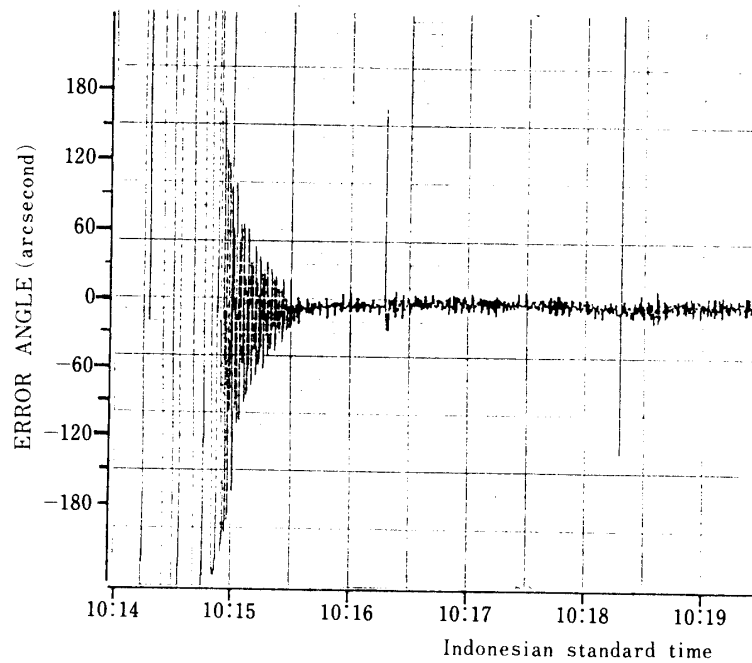


図4 規正 ON 直後の姿勢

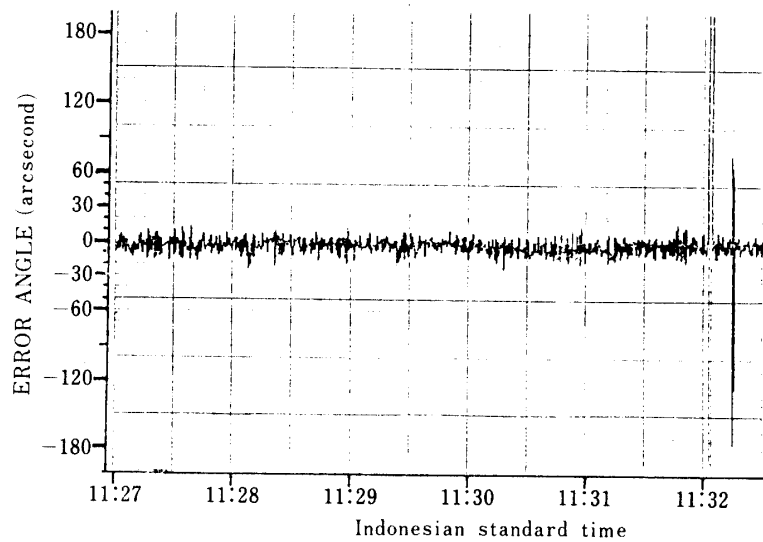


図5 日食観測中の姿勢

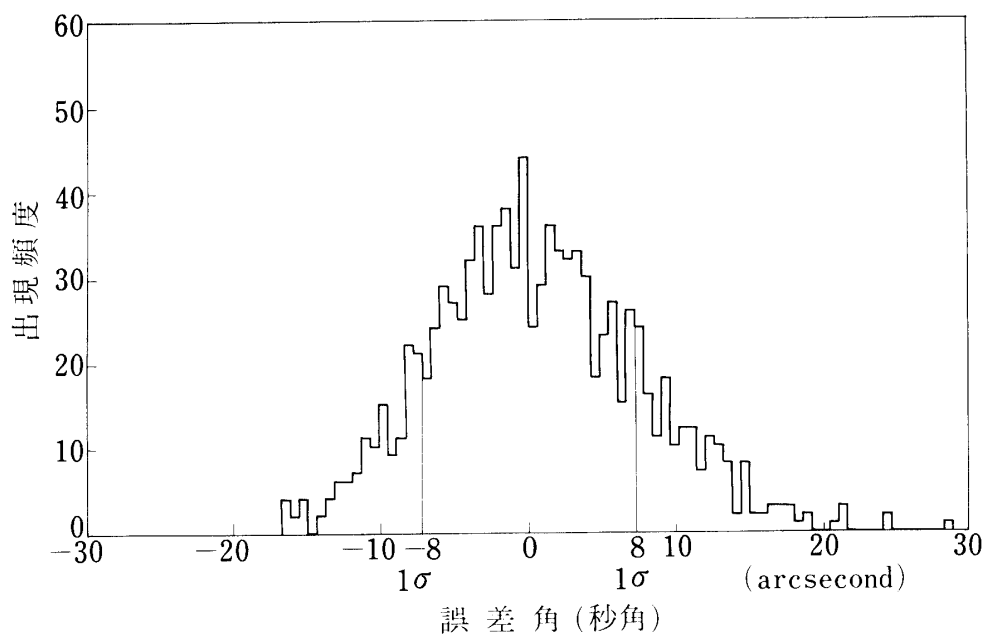


図6 誤差角分布

6. おわりに

解析的な方法により制御に関するパラメータを最少にし、その値のとりえる範囲を限定することができた。計算機によるシミュレーションでは、パラメータを決定でき制御の動作を分り易いものとなった。今后フライホイールとゴンドラとの慣性モーメント比を更に高め、小型軽量化へと努力したい。

参考文献

- [1] 西村純 他：宇宙研究報告 6, 249 (1970) H. Hirose et al. Proc. 9th ISTS. 1095 (1977)
- [2] 西村純 他：宇宙研究報告 4, 59 (1982)