太陽電池パドルのフレキシビリティ制御*

(第2報, 差動形太陽電池センサと状態推定による振動抑制・姿勢制御の一方法)

福田 敏 男**, 栗 林 豊***
細 貝 英 実**, 矢 島 信 之****

Flexibility Control of Solar Battery Arrays

(2nd Report, Vibration and Attitude Control Based on State Estimation of
Differential Solar Cell Sensors)by Toshio FUKUDA, Yutaka KURIBAYASHI,
Hidemi HOSOKAI, and Nobuyuki YAJIMA

In this paper, a differential solar cell sensor consisting of a pair of adjacent solar cells is proposed as a new type of sensors to measure vibration of flexible solar battery arrays and to orient the array toward the sun correctly. This sensor, which is small and light, has characteristics of linearity and can be implemented easily without compensation of distance. To eliminate noises in the sensor outputs, the Kalman filtering method is employed, based on the dynamics of a flexible solar arrays which is developed in a different way of the previous paper. Then all states can be fed back in an optimal closed control system, so that the control performance can be improved in vibration and attitude control.

Key Words: Application of Control, Flexible Solar Battery Array, Vibration and Orientation Control, Differential Solar Cell Sensor, State Estimation

1. 結 言

人工衛星や宇宙ステーションなどの宇宙構造物は、今後、ますます、大形化の傾向にあるが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、ロケットの運搬能力の制限のために極めて軽量の構造特性を有するようになる⁽³⁾。特に、これらの大形宇宙構造物 LSS (Large Space Structure) のうちの一つである太陽電池パドルは、宇宙におけるシステム全体の動力源として、極めて大きく、かつ、軽量で低い剛性をもつため、低い振動周波数特性を有する。著者らは、既報⁽⁴⁾で、曲げ振動のみを考慮して、このような大規模宇宙構造物用の柔軟な太陽電池パドルを片持ばりでモデル化して、従来の剛体系の制御方法に対して、展開後のパドルを分布定数系と見なす制御方法をフレキシビリティ制御として提案した。その中で、パドルを大回転させた場合のパドルの残留振動の抑制、光源からの受光量を最大にする姿勢制御を行い、特に、宇宙空間におけるパドルのたわみセンサとしての太陽電池センサ

の有効性を示した。

本論文では、太陽電池を用いたパドルのたわみセンサを改良し、差動形にすることにより、既報で提案したセンサと比較して、光源からの距離の影響を除去し、精度の向上、演算時間の短縮等の改善を行ったので報告する。さらに、フレキシビリティ制御の改善を行うことを目的として、雑音の影響をできるだけ除去するために、柔軟なパドルの動特性方程式に基づいた、カルマンフィルタを用いて状態推定を行い、柔軟なパドルのたわみ速度も考慮した最適フィードバックゲインを用いた状態フィードバック制御を行い、良好な結果を得たので報告する。

2. 差動形太陽電池センサ

2・1 差動形太陽電池センサの構造と角度推定法

図1に、モデル化した太陽電池パドルの座標系を示す。柔軟な片持ち状の模擬太陽電池パドルを衛星を模擬する剛体の軸に固定し、リアクションホイールやコントロールモーメントジャイロを模擬する駆動モータで回転駆動し、制御することを考える。図1中、 θ は、軸の回転角であり、 α はセンサが取付けてある位置でのパドルの傾き角を表す。

今回試作した差動形太陽電池センサの概略図を図2

* 昭和59年3月30日、第61期通常総会講演会および昭和59年10月16日、第62期全国大会講演会において普通講演として講演、原稿受付 昭和60年4月2日。

** 正員、東京理科大学工学部(〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

*** 学生員、東京理科大学大学院。

**** 工業技術院機械技術研究所(〒305 茨城県新治郡桜村並木1-2)。

に示す。太陽電池 A, B は 2 個並べて取付け、そのまわりを囲んだカバーによって入射光を制限し、2 個の太陽電池の受光量によってパドルの傾きを計測する。ここで、太陽電池 A, B の受光面積を、それぞれ、 S_A , S_B とすると、パドルの傾きは次の式で表される。

$$\theta^* = \tan^{-1} \left\{ \frac{w-c}{h} \left(\frac{S_A - S_B}{S_A + S_B} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta^* = \alpha + \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 w は太陽電池の受光面の幅であり、 h は壁の高さ、 c はカバーの長さである。

この差動形太陽電池センサの形状による物理的測定可能な限界角 $\theta_{\max}$ は、

$$\theta_{\max} = \text{Min} \{ \tan^{-1} (w-c)/h, \tan^{-1} c/h \}$$

で与えられる。ここで、 w, h を一定とすると、形状による最大測定限界角 $\theta_{\max}$ は、 $c=w/2$ の時に、 $\tan^{-1} \{w/2h\}$ となる。

ひずみゲージでは、たわみの空間の 2 階微分を基本的に計測するのに対して、ここで提案するセンサではたわみの空間の 1 階微分を計測するものである。この差動形センサは、既報⁽⁴⁾の 1 個の太陽電池センサと比較すると、光源からの距離を考慮した補償が不要になり、式(1)のように、計算時間が短縮され、図 3 に示す線形性を有する点が異なる。この試作したセンサの外形は横 22 mm × 縦 10 mm × 高さ 3.8 mm で、重量

は約 1 g、精度は現段階で約 2 % で、このような目的のセンサとしては、小形軽量であることを特徴とする。

2.2 差動形太陽電池センサを用いた振動モード推定

このセンサは、動的には、1 kHz 程度の帯域幅を有しており、フレキシブルなパドルの基本固有振動数が 1 Hz 以下であることを考慮すれば、十分使用可能と考えられる。

そこで、この差動形センサを片持ばり状のパドル上に M 箇所取付け、振動のモード推定を行う。 $\phi_i(x)$, $a_i(t)$ をそれぞれ i 次のモード正規関数、時間関数とすると、パドルのたわみ $y(x, t)$ は次のように展開される。

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \phi_i(x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

パドルの任意の位置 x におけるたわみ角は、式(3)を微分して次の式を得る。

$$\partial y(x, t) / \partial x = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \phi'_i(x) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、たわみの変化率は $\tan \alpha$ で表されるので、

$$\tan \alpha = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \phi'_i(x) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。 N 次までの振動モードを考慮し、測定点を M 箇所とし、一般化逆行列を用いて、行列表現をすると次のように表される。

$$\bar{a}(t) = P^T b(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$$\bar{a}^T = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t)\}$$

$$b^T = \{\tan \alpha_1(t), \tan \alpha_2(t), \dots, \tan \alpha_M\}$$

$$P = (p_{ij}) = \{\phi'_j(x_i)\}_{j=1, \dots, N}^{i=1, \dots, M}$$

模擬衛星軸を固定し、モード関数として、片持ばりのモード関数を用い、式(6)より、 $N=M=3$ の場合のパドルの自由振動のモード推定を行った結果の一例を図 4 に示す。この結果より、十分パドルのフレキシビリティ制御のセンサとして利用可能であると考えられる。

図 1 太陽電池パドルの座標系

図 2 差動形太陽電池センサの構造

図 3 差動形太陽電池センサの性能

3. カルマンフィルタによる状態推定 とフレキシビリティ制御

差動形太陽電池センサは、単一の太陽電池センサよりも雑音が比較的に少ないが、図4に示したように、雑音による成分が測定値に含まれる。そこで、パドルの動特性は、既知⁽⁴⁾なので、これを用いてカルマンフィルタを構成し、雑音の影響を少なくすることを考える。このパドルの N モードまで展開した動特性方程式を基礎として、システム雑音 $w'(t)$ と、観測雑音 $n'(t)$ の2種類が加わった状態方程式は次のように表される。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A'x(t) + b_1' u(t) + b_w' w'(t) \\ y(t) = C'x(t) + n'(t) \end{cases} \quad (8)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A' &= \text{Block diag.} \left\{ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_1^2 & 0 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_N^2 & 0 \end{pmatrix} \right\} \\ b_1'^T &= (0 \dots 0 \phi_1'(0)/2 \dots 0 \phi_N'(0)/2) / (I_h + I_b) \\ x^T &= (a_0 \dot{a}_0, a_1 \dot{a}_1 \dots a_N \dot{a}_N) \\ C' &= \begin{bmatrix} \phi_0'(0) & 0 & \phi_1'(0) & 0 & \dots & \phi_N'(0) & 0 \\ 0 & \phi_0'(0) & 0 & \phi_1'(0) & \dots & 0 & \phi_N'(0) \\ \phi_0'(x_1) & 0 & \phi_1'(x_1) & 0 & \dots & \phi_N'(x_1) & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_0'(x_M) & 0 & \phi_1'(x_M) & 0 & \dots & \phi_N'(x_M) & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

で、雑音 $w'(t)$ と $n'(t)$ は無相関の白色雑音で、平均値零の次の統計的性質を有するものとする：

$$\begin{cases} E\{w'(t_1)w'(t_2)\} = Q_1'\delta(t_1 - t_2) \quad (Q_1' \geq 0) \\ E\{n'(t_1)n'^T(t_2)\} = R_1'\delta(t_1 - t_2) \quad (R_1' > 0) \\ E\{w(t_1)n'^T(t_2)\} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(8)で表されるシステムに対して、状態推定のため、カルマンフィルタを次のように構成することができる⁽⁵⁾。

$$\begin{cases} \hat{x}(t) = A'\hat{x}(t) + b_1' u(t) + K'(t)\{y(t) - C'\hat{x}(t)\} \\ K'(t) = P'(t)C'^T R_1'^{-1} \\ \dot{P}(t) = A'P' + P'A'^T - P'C'^T R_1'^{-1} C'P' + b_w' Q_1 b_w'^T \end{cases} \quad (10)$$

図4 差動形太陽電池センサによるモード推定

ただし、 $P'(0) = P_0'$ とし、 $K'(t)$ はカルマンフィルタゲインである。

太陽電池パドルの制御目的は、

(1) 太陽光受光量が最大となる方向へパドルの姿勢制御を行うこと

(2) この方向追尾姿勢制御中のパドルの振動を抑制制御すること

である。これらを行うために、上記の状態推定値を用いて、次の状態フィードバック制御を行う。

$$u(t) = f_0'^T \{x^*(t) - \hat{x}(t)\} \quad (11)$$

ここで、 $x^*(t)$ は設定値であり、 f_0' は時不変なフィードバックゲインベクトルである。

また、式(11)の代わりに、最適制御を行う場合には、次の評価関数を最小にするよう、制御入力 $u(t)$ を決めることができる。

$$J(T_1) = \int_0^{T_1} \{ [x^*(t) - \hat{x}(t)]^T Q_2' [x^*(t) - \hat{x}(t)] + R_2' u^2 \} dt \quad (12)$$

ここで、 $Q_2' = Q_2'^T \geq 0$, $R_2' > 0$ で、 T_1 は終端時間である。この最適レギュレータの解は次のように与えられる。

$$\begin{cases} u^*(t) = f^*(t) \{x^*(t) - \hat{x}(t)\} \\ f^*(t) = b_1' S(t) / R_2' \\ \dot{S}(t) = -A'^T S(t) - S(t) A' + S(t) b_1' R_2' b_1'^T S(t) - C'^T Q_2' C' \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 $S(T_1) = 0$ とする。ここで、 $T_1 \rightarrow \infty$ とした場合の定常最適レギュレータのフィードバックゲイン $f^*(\infty)$ を式(11)の時不変固定フィードバックゲインベクトル f_0' として選ぶことが可能である。

実際に、マイクロコンピュータで制御するために上記の状態推定を連続時間系からサンプル間隔 Δt の離散時間系に変換すると、 A' , b_1' , b_w' , C' をそれぞれ、 A , b_1 , b_w , C と置き換えて、次のようになる。

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + b_1 u(k) + b_w w(k) \\ y(k) = Cx(k) + n(k) \end{cases} \quad (14)$$

ただし、

$$A = e^{A'\Delta t}, \quad b_1 = \int_0^{\Delta t} e^{A'\Delta t} d_2 b_1', \quad b_w = \int_0^{\Delta t} e^{A'\Delta t} d_2 b_w'$$

$$C = C'$$

よって、

$$\begin{aligned} A &= \text{Block diag.} \left\{ \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \right. \\ &\quad \begin{pmatrix} \cos(\Delta t \omega_1) & \sin(\Delta t \omega_1)/\omega_1 \\ -\omega_1 \sin(\Delta t \omega_1) & \cos(\Delta t \omega_1) \end{pmatrix}, \\ &\quad \dots, \begin{pmatrix} \cos(\Delta t \omega_N) & \sin(\Delta t \omega_N)/\omega_N \\ -\omega_N \sin(\Delta t \omega_N) & \cos(\Delta t \omega_N) \end{pmatrix} \left. \right\} \end{aligned}$$

提案し、(2)その雑音を取り除くために、フレキシブルな太陽電池パドルの動特性モデルに基づくカルマンフィルタにより状態推定を行い、この状態推定値と定常最適フィードバックゲインを用いて、状態フィードバック制御により、そのフレキシビリティ制御の有効性を示した。

本論文で提案した差動形センサは、はりの軸方向だけでなく、軸に垂直方向に取付けることにより、はりのねじれ振動計測としても用いることができる。したがって、この原理に基づき、一つのセンサで平面のたわみとねじれ振動成分を同時に計測することのできるセンサ構造も容易に製作することができる。また、今後、フレキシブルな太陽電池パドルのより正確な低次元モデルを求め、フレキシビリティ制御を実系に適用できるよう改善する必要がある。

終わりに、本実験を遂行する際に協力いただいた築林譲君(元東京理科大学学生)に感謝致します。

文 献

- (1) Ballas, M. J., Some Trends in Large Space Structure Control Theory: Fondest Hopes; Wildest Dreams, JACC on Control of Large Aerospace Structure: State of Technology, (1979), 42.
- (2) Edmunds, R. S., LSS Reference Platform Control, Large Space Systems Technology, 1981 3rd Annual Tech. Rev., (1981), 313.
- (3) Kops, L. edited, Manufacturing in Space, ASME, PED-vol. 11, (1983).
- (4) 福田・栗林・細貝・矢島, 太陽電池パドルのフレキシビリティ制御 (第1報, 太陽光センサを用いた振動抑制・姿勢制御の一考え方), 機論, 51-465, C (昭60), 979.
- (5) Takahashi, Y., Rabins, M. J. and Auslauder, D. M., Control, (1972), 614, Addison Wesley.