

# プロパーな近似 DVDFB による柔軟宇宙構造物の 周波数依存型評価関数に対する最適制御

小林 洋二\*, 鹿田 哲生\*\*, 姜 貴暢\*\*\*, 山中 貴裕\*\*\*\*

## Optimal Control for Flexible Space Structures by a Proper Approximation of DVDFB with a Frequency Dependent Cost Function

Yohji KOBAYASHI\*, Tetsuo SHIKATA\*\*,  
Kuichang KANG\*\*\*, and Takahiro YAMANAKA\*\*\*\*

### ABSTRACT

This paper considers robust synthesis of optimal control for flexible space structures with collocated sensors and actuators. The idea of direct velocity and displacement feedback (DVDFB) is adopted. A filter of the relative degree 1 is introduced at the input channel to approximate DVDFB by a proper controller for implementation. The proper approximation of DVDFB is employed for robustness of optimal control against high frequency residual modes which are usually neglected in low dimensional models for control system design. It is shown that the overall closed-loop system becomes optimal for a frequency dependent quadratic cost function by appropriately choosing the filter parameters and the DVDFB gains. In the cost function, the weight on the control input increases with no bound in the high frequency range to suppress the control spillover to the residual modes.

*Keywords:* flexible space structures, displacement output feedback, optimal control, robust control

### 1. はじめに

宇宙太陽発電衛星<sup>(1),(2)</sup>のような大型宇宙構造物においては、打上げコスト削減のために構造物本体の軽量化が図られる。その結果、宇宙構造物は柔軟構造物となり、無数の振動モードをもつことになる。このような柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を制御する手法として、これまでにセンサとアクチュエータを同位置・同方向に配置(コロケーション)する前提のもとで、速度と変位の静的出力フィードバックを施す Direct Velocity and Displacement Feedback (DVDFB) 制御<sup>(3)</sup>が提案されている。この DVDFB は、宇宙構造物の特性パラメータの不確かさに対して、閉ループシステムをロバスト安定化できるだけでなく、フィードバックゲインを適当に定めることにより、閉ループシステムをある二次形式評価関数に対して最適レギュレータにて

きるなど優れた性質をもっている<sup>(3)</sup>。しかしながら、DVDFB を実装するためには、変位センサと速度センサの両方が必要となり、これはコストと信頼性の面から好ましくない。一方、柔軟宇宙構造物の制御システムを設計する際には、高周波域にある高次の振動モードを無視した低次元化モデル<sup>(4)</sup>が用いられる。したがって、実際の構造物には、低次元化の際に無視された振動モードが残存することになる。この無視された振動モードが励起された場合、閉ループシステムは意図した応答特性を実現できず、コントローラのパラメータの選び方によっては、不安定になる可能性がある。

これらの問題に対して、本論文ではセンサ/アクチュエータ・コロケーションのもとで、変位出力のフィードバックのみを用いたプロパーなコントローラによって DVDFB を近似する手法を提案する。そして、提案法によって構成される閉ループシステムが、ある二次形式評価関数を最小にする最適レギュレータになるようにコントローラのパラメータを選ぶことができ、そのとき閉ループシステムは、操作入力に対する周波数依存型の

\* 機械工学科 教授

\*\* 専攻科 機械システム工学専攻(平成 18 年 3 月 修了)

\*\*\* 専攻科 機械システム工学専攻(平成 19 年 3 月 修了)

\*\*\*\* 専攻科 機械システム工学専攻(平成 20 年 3 月 修了)

評価関数を最小にする最適レギュレータになることを示す。この周波数依存型の最適制御によって、無視された高周波域の振動モードに対するゲインを一定値以下に抑制し、閉ループシステムをロバスト安定化することができる。

本論文では、まず、柔軟宇宙構造物の運動を二階の微分方程式で記述する。そして、DVDFBと高域遮断特性をもつ一次遅れフィルタを組み合わせたコントローラを考え、このコントローラが変位出力のみを用いたプロパーなコントローラで実装できることを示す。つぎに、宇宙構造物と一次遅れフィルタによって構成される拡大系を考え、この拡大系にDVDFBとフィルタの出力フィードバックを施したシステムが、プロパーなコントローラに変位出力をフィードバックして構成される閉ループシステムと等価であることを示す。そして、閉ループシステムがある二次形式評価関数を最小にする最適レギュレータになるために、コントローラのパラメータが満たすべき条件を導き、そのとき得られた閉ループシステムが操作入力についての周波数依存型評価関数を最小化する最適レギュレータになることを示す。最後に、提案法を用いれば、構造物の低次元化モデルにもとづいて設計されたコントローラを、無視された振動モードをもつ柔軟宇宙構造物に適用した場合でも、閉ループシステムをロバスト安定化できることを数値例によって示す。

## 2. 柔軟宇宙構造物の記述

本論文では、運動方程式がつぎの二階微分方程式で表される柔軟宇宙構造物を考える。

$$M\ddot{q}(t) + D\dot{q}(t) + Kq(t) = Lu(t) \quad (1)$$

ここで、 $q(t) \in \mathbb{R}^n$  は変位/角変位を表すベクトル、 $u(t) \in \mathbb{R}^r$  は力/トルクを表す操作入力ベクトル、 $M, D, K \in \mathbb{R}^{n \times n}$  はそれぞれ質量、減衰、剛性を表す対称行列で、 $M$  は正定行列、 $D, K$  は半正定行列である。 $D, K$  の半正定性は宇宙空間における剛体モードの存在によるものである。このとき、 $D, K$  において次式が成り立つものとする。

$$\text{rank} \begin{bmatrix} D & K \end{bmatrix} = \text{rank} K \quad (2)$$

式(1)において行列  $L \in \mathbb{R}^{n \times r}$  は、宇宙構造物への入力の伝わり方を示し、アクチュエータの配置によって決まる。この行列  $L$  は列フルランクであるとする。ここでは、センサとアクチュエータを同位置、同方向に配置するセンサ/アクチュエータ・コロケーションが実現されているものとする。その場合、変位出力  $y(t) \in \mathbb{R}^r$  は次式で表される。

$$y(t) = L^T q(t) \quad (3)$$

この係数行列  $L^T$  は操作入力  $u(t)$  の係数行列  $L$  と転置の関係になる。

ここで、つぎの仮定をおく。

$$\text{rank} \begin{bmatrix} D & L \end{bmatrix} = n \quad (4)$$

これは剛体モードに関する式(2)のもとで

$$\text{rank} \begin{bmatrix} K & L \end{bmatrix} = n \quad (5)$$

が成り立つことを表し、式(4)、(5)は、式(1)、(3)の宇宙構造物の剛体モードが可制御かつ可観測であることを意味している。

## 3. プロパーな近似 DVDFB 制御

式(1)、(3)の宇宙構造物にDVDFB<sup>(3)</sup>を適用した場合、その操作入力  $u(t)$  は次式で与えられる。

$$u(t) = -(\hat{\alpha}\hat{R}y(t) + \hat{\beta}\hat{R}\dot{y}(t)) \quad (6)$$

ただし、 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  は正のスカラー、 $\hat{R} \in \mathbb{R}^{r \times r}$  は任意の正定行列である。これは、変位出力と速度出力の静的出力フィードバックであり、この制御則によって閉ループシステムはロバスト安定化され、かつ  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  を適当に選ぶことによって閉ループシステムは最適レギュレータになる<sup>(3)</sup>。しかしながら、DVDFBを実装する場合、変位センサと速度センサの両方が必要になり、このことはコストと信頼性の面から望ましくない。また、速度センサの代わりに、変位センサから得られる変位出力を微分器に通すことによって速度信号を得ようとした場合には、高周波域において非常に高いゲインを実現することが必要になり、これは現実的には困難である。そこで、本論文では、変位出力のみを用いたプロパーなコントローラによってDVDFBを近似的に実現し、高周波域におけるコントローラのゲインを一定の値にとどめることによって、上記の問題の解決を図る。

まず、式(1)の制御対象への操作入力  $u(s)$  を次式の高域遮断フィルタの出力で与える。

$$u(s) = \frac{1}{s+a} v(s) \quad (7)$$

ただし、 $a$  はフィルタの折点周波数を表し、 $v(s)$  はフィルタの入力を表す。このフィルタの一つの実現は、

$$\dot{z}(t) = -az(t) + v(t) \quad (8)$$

$$u(t) = z(t) \quad (9)$$

で表される。ここで、 $z(t) \in \mathbb{R}^r$  はフィルタの出力を表す。フィルタへの入力  $v(t) \in \mathbb{R}^r$  は次式で与える。

$$v(t) = -\gamma(\alpha Ry(t) + \beta R\dot{y}(t) + z(t)) \quad (10)$$

上の式において、 $\alpha, \beta, \gamma$  はそれぞれ正のスカラー、 $R \in \mathbb{R}^{r \times r}$  は任意の正定行列である。式(8)、(9)のフィルタと式(10)のフィードバックで構成されるコントローラの伝達関数は、

$$u(s) = -\frac{\gamma(\beta s + \alpha)}{s + (a + \gamma)} Ry(s) \quad (11)$$

と計算される。式(11)は、ここで提案するコントローラが、制御対象の変位出力  $y(s)$  のみを入力とするプロパーな一次の伝達関数で表されるコントローラとして実装できることを意味している。また、式(11)において  $\gamma$  を十分に大きくしたとき、

$\omega/\gamma \approx 0$  とみなせる周波数域では、 $u(s) \approx (\beta s + \alpha) Ry(s)$  となる。この右辺は DVDFB によるコントローラの伝達特性を表し、式 (11) は DVDFB を近似したコントローラになっていることがわかる。以下では、式 (11) で表されるコントローラをプロパーな近似 DVDFB とよぶ。

#### 4. プロパーな近似 DVDFB による最適制御

式 (1), (3) の宇宙構造物と式 (8), (9) のフィルタからなる拡大系の状態方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bv(t) \\ x(t) &= \begin{bmatrix} q^T(t) & \dot{q}^T(t) & z^T(t) \end{bmatrix}^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & I_n & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D & M^{-1}L \\ 0 & 0 & -aI_r \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $I_n$ ,  $I_r$  はそれぞれ  $n$ ,  $r$  次の単位行列を表す。

式 (1), (3) の宇宙構造物の変位出力を式 (11) のコントローラに入力することによって得られる閉ループシステムは、この拡大系に式 (10) のフィードバックを施したシステムと等価である。得られた閉ループシステムが最適レギュレータになるためにコントローラパラメータが満たすべき条件は、つぎの定理で与えられる。

[定理] 式 (12) の拡大系に式 (10) のフィードバックを施して得られる閉ループシステムは安定であり、つぎの二次形式評価関数を最小にする最適レギュレータになる。

$$J = \int_0^\infty \left( x^T(t)\tilde{Q}x(t) + v^T(t)\tilde{R}v(t) \right) dt \quad (13)$$

$$\tilde{Q} = T^T \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{12}^T & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{13}^T & Q_{23}^T & Q_{33} \end{bmatrix} T \quad (14)$$

$$Q_{11} = 2\alpha K + \alpha^2 LRL^T, \quad Q_{12} = 0$$

$$Q_{13} = (\alpha I_n + \beta KM^{-1})L$$

$$Q_{22} = 2(\beta D - \alpha M) + \beta^2 LRL^T$$

$$Q_{23} = \{(\beta a - \alpha)I_n + \beta DM^{-1}\}L$$

$$Q_{33} = \gamma\{(2a + \gamma)R^{-1} - 2\beta L^T M^{-1}L\}$$

$$T = \begin{bmatrix} \gamma I_n & 0 & 0 \\ 0 & \gamma I_n & 0 \\ 0 & 0 & I_r \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R} = R^{-1}$$

ただし、コントローラパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  は  $\tilde{Q}$  が正定になるように決められ、かつ、

$$\gamma R^{-1} - \beta L^T M^{-1}L > 0 \quad (15)$$

を満たすものとする。

(証明) 制御対象がもつ不安定極は、固有値 0 の剛体モードのみであり、これらの剛体モードは、式 (4), (5) より可制御である

から、制御対象は可安定である。一方、制御対象に直列に接続されている式 (7) のフィルタは有限の零点をもたないため、制御対象とフィルタの間で不安定な極と零点の相殺は起こらない。よって、制御対象とフィルタからなる式 (12) の拡大系  $(A, B)$  は可安定である。 $(A, B)$  が可安定であれば、正定行列  $\tilde{Q}$  について、つぎの Riccati 方程式

$$\tilde{P}A + A^T\tilde{P} - \tilde{P}B\tilde{R}^{-1}B^T\tilde{P} = -\tilde{Q} \quad (16)$$

は、正定一意解  $\tilde{P}$  をもつ。

ところで、行列  $\tilde{P}$  を

$$\tilde{P} = T^T \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} \end{bmatrix} T \quad (17)$$

$$P_{11} = \alpha D + \beta K + \alpha\beta LRL^T$$

$$P_{12} = \alpha M, \quad P_{13} = \alpha L$$

$$P_{22} = \beta M, \quad P_{23} = \beta L, \quad P_{33} = \gamma R^{-1}$$

で与えると、この  $\tilde{P}$  は式 (16) の Riccati 方程式を満たし、定理の式 (15) が満たされれば正定になる。よって、この  $\tilde{P}$  は、Riccati 方程式の正定一意解である。

この  $\tilde{P}$  を用いて、最適制御則を計算すると、

$$\begin{aligned} v(t) &= -\tilde{R}^{-1}B^T\tilde{P}x(t) \\ &= -\gamma(\alpha Ry(t) + \beta Ry(t) + z(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

となる。これは、式 (10) のフィードバックと一致する。したがって、式 (12) の拡大系に式 (10) のフィードバックを施して構成される閉ループシステムは、最適レギュレータを構成し、安定であることがわかる。

(証明終わり)

ここで、高域遮断フィルタにおける入出力の関係と Parseval の等式を用いて式 (13) の評価関数を周波数領域で表すと、

$$\begin{aligned} \tilde{J} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( x^*(j\omega)\tilde{Q}x(j\omega) \right. \\ &\quad \left. + u^*(j\omega)\tilde{R}u(j\omega) \right) d\omega \end{aligned} \quad (19)$$

となる。ただし、\* は共役転置を表し、

$$\tilde{R}(j\omega) = [W(j\omega)^{-1}]^* \tilde{R}W(j\omega)^{-1} \quad (20)$$

$$W(j\omega) = \frac{1}{j\omega + a} I_r \quad (21)$$

である。式 (19) の右辺第二項は、高周波域で重みが大きくなる周波数依存型重み  $\tilde{R}(j\omega)$  によって  $u(j\omega)$  を評価することを意味している。したがって、式 (10) の制御則は、制御対象へ加える操作入力  $u(t)$  の高周波成分のゲインを一定値以下に抑える周波数依存型最適レギュレータ<sup>(5)</sup>を構成している。このことから、低次元化の際に無視された高周波域の振動モードが宇宙構造物に存在しても、操作入力  $u(t)$  の高周波成分のゲインは一定値以下に抑制されるため、高周波域の振動モードの励起を抑制

することができ、その結果として式(10)の制御則は、閉ループシステムをロバスト安定化できる。

式(7)の高域遮断フィルタにおいて任意の  $a$  が与えられたとき、定理の条件を満たす  $\alpha, \beta, \gamma$  が必ず存在することは容易に示すことができる。これらのパラメータの選び方の一例として、まず、任意の  $\alpha > 0$  を選ぶ。この  $\alpha$  に比べて十分大きな  $\beta$  を選ぶことにより、式(14)の右辺の  $T^T$  と  $T$  ではさまれた行列の左上隅  $2 \times 2$  ブロックを正定にすることができる。さらに、これらの  $\alpha, \beta$  に対して、 $\gamma$  を大きく選ぶことによって、式(14)の右辺の  $T^T$  と  $T$  ではさまれた行列を正定にでき、かつ式(15)を満たすことができる。なお、式(7)の高域遮断フィルタにおいて、 $a = 0$  として積分器を用いた場合には、式(14)の  $Q_{33}$  の正定性によって式(15)の条件は不要になる。

5. 数値例

ここでは、本論文で提案したプロパーな近似 DVDFB を用いた柔軟宇宙構造物の閉ループシステムの応答特性についてシミュレーションを行い、その有効性を示す。例として、Fig. 1 のように横方向に並んだ矩形の剛体 11 ~ 15 と 21 ~ 25 を、バネとダンパで近似される柔軟なリンクによって横方向と斜め方向に柔結合して構成される宇宙構造物を考える。 $ij$  ( $i = 1, 2, j = 1, \dots, 5$ ) 番目の剛体は、 $x_{ij}, y_{ij}$  方向の並進運動と質量中心  $O_{ij}$  回りに  $\theta_{ij}$  方向の回転運動を行うものとする。各剛体の質量を  $m_{ij}$  で、慣性モーメントを  $J_{ij}$  で表し、剛体を結合するリンクのバネとダンパの定数を  $k_{ijk}, d_{ijk}$  ( $i = 1, 2, j = 1, \dots, 5, k = 1, 2, 3$ ) で表す。ただし、剛体 15 と剛体 21 を結合するリンクのバネとダンパの定数は  $k_{ck}, d_{ck}$  ( $k = 1, 2, 3$ ) で表す。なお、センサとアクチュエータは、剛体 13 の質量中心に設置され、センサは剛体 13 の  $x_{13}, y_{13}$  方向の変位と  $\theta_{13}$  方向の角変位を計測するものとし、アクチュエータは、操作入力として  $x_{13}, y_{13}$  方向の力と質量中心  $O_{13}$  回りのトルクを加えるものとする。また、すべての剛体について  $x_{ij} = 0, y_{ij} = 0, \theta_{ij} = 0$  で静止しているとき、剛体間の柔軟なリンクのバネとダンパによる力およびトルクは 0 であるとする。

制御系設計に用いる低次元化モデルは、剛体 11 ~ 15 をまとめて剛体 1、剛体 22 ~ 25 をまとめて剛体 2 と考えて、Fig. 2 のように表されるものとする。

Fig. 2 の低次元化モデルにおいて、 $i$  ( $i = 1, 2$ ) 番目の剛体は、 $x_i$  方向と  $y_i$  方向の並進運動と質量中心  $O_i$  回りに  $\theta_i$  方向の回転運動を行う。各剛体の質量を  $m_i$ 、慣性モーメントを  $J_i$  で表し、結合点  $ij$  ( $i = 1, 2, j = 1, 2$ ) は、 $i$  番目の剛体における  $j$  番目の結合点を表し、 $l_{ij}$  は、剛体の質量中心から結合点  $ij$  までの距離を表す。 $\psi_{ij}$  は、質量中心と結合点  $ij$  を結ぶ線分と剛体の辺がなす角度を表し、 $\phi_{ij}$  は、結合点  $ij$  において剛体の辺と斜めに取り付けられたリンクが剛体の辺となす角度を表す。なお、センサとアクチュエータは、Fig. 1 の宇宙構造物と整合性をもたせるために、剛体 1 の質量中心に設置され、センサは剛体 1 の  $x_1, y_1$  方向の変位と  $\theta_1$  方向の角変位を計測するものとし、アクチュエータは、操作入力として  $x_1, y_1$  方向の力と

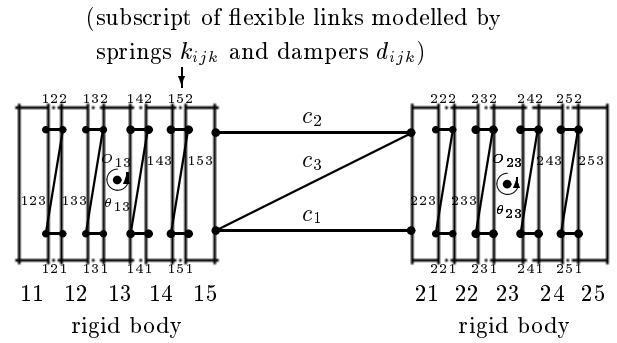


Fig. 1 A flexible space structure

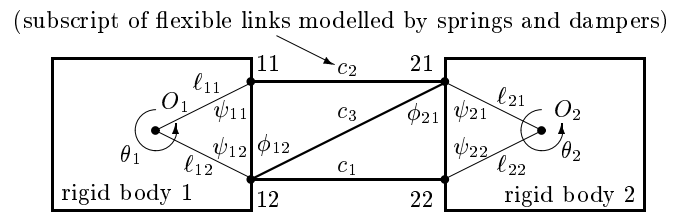


Fig. 2 A low dimensional model of the flexible space structure in Fig. 1

質量中心  $O_1$  回りのトルクを加えるものとする。まず、この低次元化モデルを用いてプロパーな近似 DVDFB のパラメータを決定し、そのコントローラを用いて Fig. 2 の低次元化モデルを制御した場合を考える。各剛体の運動は、変位ベクトル  $q(t)$  を

$$q(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & y_1(t) & \theta_1(t) & x_2(t) & y_2(t) & \theta_2(t) \end{bmatrix}^T$$

と選ぶことにより、式(1), (3)の形に表すことができる。なお、式(1)の係数行列は、次式で表される。

$$M = \text{diag} \begin{bmatrix} m_1 & m_1 & J_1 & m_2 & m_2 & J_2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} N_1 \\ -N_2 \end{bmatrix} D_c \begin{bmatrix} N_1^T & -N_2^T \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} N_1 \\ -N_2 \end{bmatrix} K_c \begin{bmatrix} N_1^T & -N_2^T \end{bmatrix}$$

$$N_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sin \phi_{12} \\ 0 & 0 & \cos \phi_{12} \\ l_{12} \cos \psi_{12} & -l_{11} \cos \psi_{11} & l_{12} \sin(\psi_{12} + \phi_{12}) \end{bmatrix}$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sin \phi_{21} \\ 0 & 0 & \cos \phi_{21} \\ l_{22} \cos \psi_{22} & -l_{21} \cos \psi_{21} & -l_{21} \sin(\psi_{21} + \phi_{21}) \end{bmatrix}$$

$$D_c = \text{diag} \{ d_{c1}, d_{c2}, d_{c3} \}$$

$$K_c = \text{diag} \{ k_{c1}, k_{c2}, k_{c3} \}$$

$$L = \text{diag} \begin{bmatrix} I_3 & 0_3 \end{bmatrix}$$

ここで、 $N_1, N_2$  は、二つの剛体の結合の仕方を表し、 $K_c, D_c$  は、剛体を柔結合しているリンクのバネとダンパの特性を表す

行列である．また， $I_3, 0_3$  はそれぞれ，三次の単位行列とゼロ行列を表す．

宇宙構造物の剛体の質量と慣性モーメント，結合に用いる柔軟なリンクのバネ定数とダンパの定数をつぎのように与える．

$$m_i = 1.0, J_i = 0.5, i = 1, 2$$

$$k_{cj} = 1.0, d_{cj} = 0.16, j = 1, 2, 3$$

また， $\ell_{ij}, \psi_{ij}, \phi_{ij}$  は，それぞれつぎのように与える．

$$\ell_{ij} = 1.0, \psi_{ij} = \pi/3 [\text{rad}], \phi_{ij} = \pi/3 [\text{rad}], i, j = 1, 2$$

このとき， $u$  から  $y$  への周波数伝達関数の特異値をプロットすると Fig. 3 となる．この図より構造物の振動モードの最大値は約 3 [rad/sec] となるので，高域遮断フィルタの折点周波数  $a$  は，すべての振動モードがフィルタの帯域に入るように  $a = 10.0$  [rad/sec] と選ぶ．さらに，コントローラのパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma, R$  は，第 4 章の定理を満たすようにつぎの値とした．

$$\alpha = 4.0, \beta = 3.1 \times 10^2, \gamma = 1.3 \times 10^3, R = I_3 \quad (22)$$

Fig. 2 の構造物において，初期変位として剛体 1 の  $x_1, y_1$  方向に変位  $x_1(0) = 0.1, y_1(0) = -0.1$  を与えたとき，閉ループシステムにおける剛体 1 と剛体 2 の  $x, y$  方向の変位と  $\theta$  方向の角変位の初期値応答はそれぞれ Fig. 4 の Case 1 のようになる．この図より閉ループシステムは，提案法によって安定化されていることがわかる．比較のため，式 (22) の  $\alpha, \beta$  を用いた DVDFB によって制御した場合の閉ループシステムの応答を Case 2 に示す．Case 1 と Case 2 の応答を比較することにより，提案法が DVDFB と同等の応答特性を実現していることがわかる．

つぎに，Fig. 2 の低次元化モデルを用いて設計されたプロパーな近似 DVDFB を，Fig. 1 の構造物に適用した場合について考える．Fig. 1 の構造物において，各剛体の質量と慣性モーメント，結合に用いる柔軟なリンクのバネ定数とダンパの定数を以下のように与える．

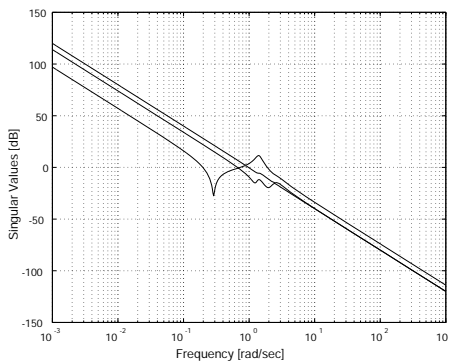


Fig. 3 Singular values of the frequency response of the low dimensional model in Fig. 2

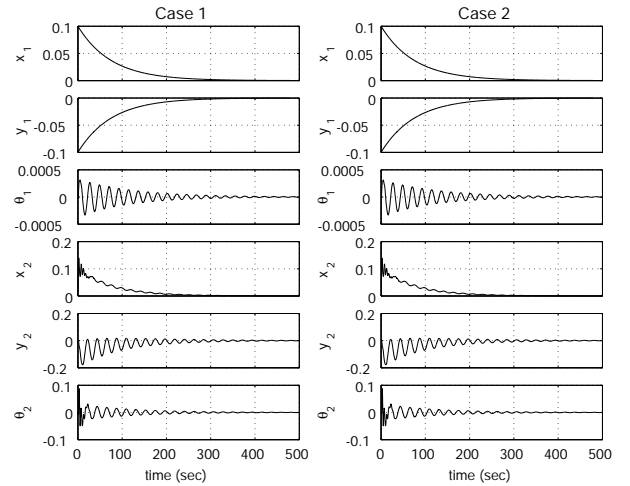


Fig. 4 Initial-state responses of  $x_i, y_i,$  and  $\theta_i$  ( $i = 1, 2$ ) of the low dimensional model in Fig.2, controlled by the proposed method (Case 1), and by DVDFB (Case 2)

$$m_{1j} = 0.1, J_{1j} = 0.01, j = 1, 2, 4, 5$$

$$m_{13} = 0.6, J_{13} = 0.06$$

$$m_{2j} = 0.2, J_{2j} = 0.02, j = 1, \dots, 5$$

$$k_{ijk} = 8.0 \times 10^3, d_{ijk} = 2.5,$$

$$i = 1, 2, j = 1, \dots, 5, k = 1, 2, 3$$

また，質量中心  $ij$  と結合点  $ijl$  を結ぶ線分の長さ  $\ell_{ijl}$  (ただし， $l = 1, \dots, 4$  は，各剛体の左上の結合点から左回りに付番するものとする．このとき結合点 111, 112, 253, 254 は存在しない)，その線分と剛体の辺がなす角  $\psi_{ijl}$ ，結合点  $ijl$  において剛体の辺と斜めに取り付けられたリンクがなす角  $\phi_{ijl}$  をつぎのように与える．

$$\ell_{ijl} = 0.5, \psi_{ijl} = 0.04\pi [\text{rad}], \phi_{ijl} = 0.47\pi [\text{rad}]$$

$$i = 1, 2, j = 1, \dots, 5, l = 1, \dots, 4$$

このとき，Fig. 1 の構造物の特異値は，Fig. 5 となり， $10^2 \sim$

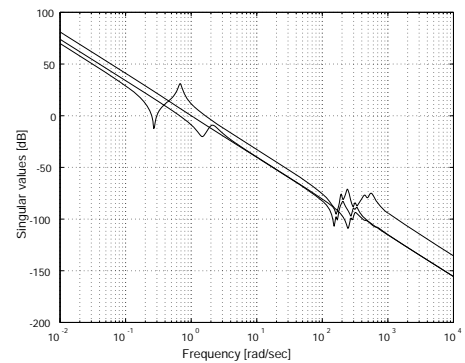
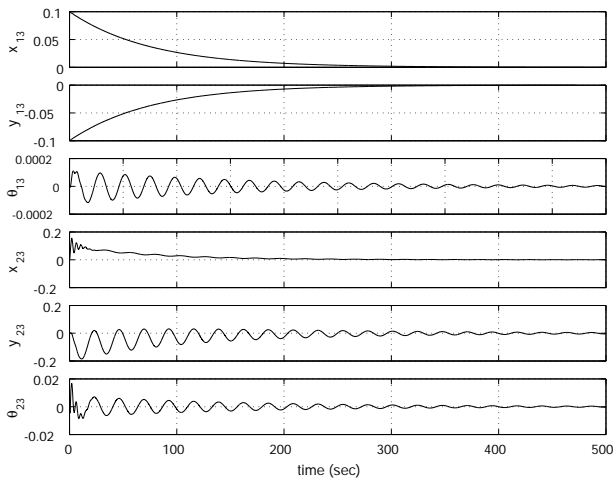


Fig. 5 Singular values of the frequency response of the flexible structure in Fig. 1



## 参考文献

- (1) Mankins J. C., The Space Solar Power Option, *Aerospace America*, Vol.35 (1997) pp.30 - 36
- (2) 泉田：宇宙太陽発電システム, 日本機械学会会員のための宇宙工学概論(日本機械学会宇宙工学部門編集), pp.183-187 (2004)
- (3) 糺谷, 池田, 木田：Collocated Feedback による宇宙構造物の最適制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.25-8, pp.54-60 (1989)
- (4) 土屋, 柏瀬：大規模宇宙構造物(LSS)の制御, 計測と制御, Vol.26-10, pp.855-862 (1987)
- (5) 池田：最適レギュレータ理論 - 再考, システム/制御/情報, Vol.34-6, pp.340-346 (1990)



**Fig. 6** Initial-state responses of  $x_{i3}$ ,  $y_{i3}$ , and  $\theta_{i3}$  ( $i = 1, 2$ ) of the structure in Fig. 1, controlled by the proposed method with the same control parameters in eq. (22)

$10^3$ [rad/sec] の角周波数領域に低次元化モデルに含まれない振動モードが存在していることがわかる。この構造物に対して、低次元化モデルを用いて設計した式(22)のコントローラパラメータを適用して初期値応答のシミュレーションを行う。初期変位は、低次元化モデルに対するシミュレーションと整合性をもたせるために、剛体  $1j$  ( $j = 1, \dots, 5$ ) において、 $x_{1j}(0) = 0.1$ ,  $y_{1j}(0) = -0.1$  と与える。このときの剛体 13 と剛体 23 の変位と角変位の初期値応答を Fig. 6 に示す。この図より低次元化モデルを用いて設計したコントローラを、低次元化の際に無視された振動モードを含む実際の柔軟宇宙構造物に適用した場合においても、閉ループシステムがロバスト安定化されていることがわかる。

## 6. おわりに

本論文では、柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を制御するシステムにおいて、センサ/アクチュエータ・コロケーションの前提のもとで、変位出力のみを用いたプロパーな近似 DVDFB によって制御する方法を提案した。まず、宇宙構造物の入力端に分母が一次、分子が零次のフィルタを直列に接続し、仮想的に変位出力と速度出力、およびフィルタの出力をフィードバックする形で閉ループシステムを構成した。そして、この制御則が構造物の変位出力のみを入力とするプロパーなコントローラとして実装でき、そのコントローラが DVDFB の近似になっていることを示した。つぎに、閉ループシステムが、最適レギュレータとなるためにコントローラのパラメータが満たすべき条件を導出し、そのとき得られる閉ループシステムは、操作入力に対して高周波域成分のゲインを一定値以下に抑える周波数依存型最適レギュレータになることを示した。最後に、提案法によって DVDFB と同等の応答性能を閉ループシステムにもたせることができ、さらに、低次元化モデルにおいて無視された高次の振動モードが宇宙構造物に存在した場合でも、閉ループシステムをロバスト安定化することを数値例によって示した。