

パラメータ依存リアプノフ関数に基づくクレーンのゲインスケジューリング制御

M2011MM031 神野雅幸

指導教員：高見勲

1 はじめに

本研究では、クレーンの滑車の走行とロープの巻き上げの2動作を同時に行うGS(ゲインスケジューリング)制御系設計法を提案する。本研究の1つ目の特徴は、状態方程式に現れるロープ長変化の速度と加速度を省略することなく制御系設計を行うことである。これに対し、先行研究ではモデル導出まではロープ長を時変パラメータとして扱っているが、制御系設計時にはロープ長変化の速度と加速度を0として扱っている。このため、本提案法は従来の制御手法と比べて制御系設計結果の精度が向上する。また、状態空間表現の枠組みでロープ長変化の速度と加速度を考慮したロバスト制御系設計やGS制御系設計を行う場合、状態方程式に非線形に現れる変動パラメータを厳密に線形なパラメータとして扱うことが困難なため、設計結果が保守的になる傾向がある。一方、ディスクリプタ変数を導入することで、設計結果の保守性を軽減できる場合があることや、パラメータ依存リアプノフ関数の扱いが容易となることが報告されている[1][2]。本研究の2つ目の特徴として、クレーンのディスクリプタ表現に対して適切なディスクリプタ変数を導入し、変動パラメータをLFTを用いて扱いやすい形で取り出すことにより、変動パラメータの非線形性を無視することのないアフィンLPVシステムを構成する。そして、ロープ長の時間変化を考慮したロバスト制御系設計法と単一のリアプノフ関数に基づくGS制御系設計法、パラメータ依存リアプノフ関数に基づくGS制御系設計法を示す。これにより、2動作を同時に行う場合のいかなるロープ長の変動に対しても安定な制御系を構築できることを理論的に保証する。また、各制御系の制御性能を H_2 ノルムを用いて評価したうえで、提案法の有効性を数値例およびシミュレーションを通して検証する。以下では $\text{He}\{M\} = M + M^T$ という記号を用いる。

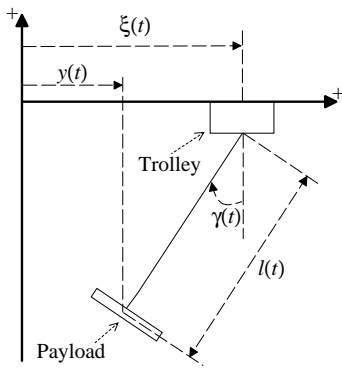


図1 クレーンモデル

2 制御対象

本研究では、ロープ長を時変パラメータとして扱った場合の吊り荷のダイナミクスを、ディスクリプタ表現の枠組みでモデル化する。その際に用いた概略図を図1に示す。観測量は、滑車の位置 ξ [m]、吊り荷の振れ角 γ [rad]、ロープ長 l [m] であり、制御量は吊り荷の水平方向の位置 y [m] ($y = \xi - l \sin \gamma$) である。操作量は走行用モータへの入力電流 I_j [A] である。ただし、以下の前提のもとでモデル化する。i) ロープは質量のない剛体棒である。ii) 吊り荷は質点である。iii) 吊り荷はタワーとブームで構成される2次元空間内で運動する。iv) 滑車の移動での摩擦は無視できる。v) γ は十分小さく、 $\sin \gamma \simeq \gamma$ 、 $\cos \gamma \simeq 1$ 、 $\dot{\gamma}^2 \simeq 0$ のように近似できる。ここで、一般化座標 $q(t)$ を $q(t) = [\xi(t) \ \gamma(t)]^T$ とおくと、吊り荷振動系の数学モデルは式(1)と与えられる。

$$E(l, \dot{l}^2)\ddot{q} + F(\dot{l}, \dot{l})\dot{q} + G(l, \ddot{l})q = HI_j \quad (1)$$

$$E = \begin{bmatrix} m_j & -m_p l \\ -m_p l & m_p l^2 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 & -2m_p \dot{l} \\ 0 & 2m_p \dot{l} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -m_p \dot{l} \\ 0 & m_p g l \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} k_{tj} \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで、状態変数を $x_p = [q^T \ \dot{q}^T]^T$ 、操作量を $u_p = I_j$ とすると、ディスクリプタ表現は式(2),(3)と与えられる。

$$E_p(l, \dot{l}^2)\dot{x}_p = A_p(l, \dot{l}, \ddot{l})x_p + B_p u_p \quad (2)$$

$$y = C(l)x_p \quad (3)$$

$$E_p = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix}, A_p = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -G & -F \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ H \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -l & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3 制御系設計

本研究では、ロープ長に関する変動パラメータ l に加えて、ロープ長の変化速度 \dot{l} と加速度 \ddot{l} を考慮した状態フィードバックコントローラを設計する。これにより、ロープ長が時間と共に変化する場合の閉ループ系の安定性が理論的に保証される。その結果、ロープの巻き上げと滑車の横行きが同時に実行でき、運搬のサイクルタイム短縮が可能となる。クレーンの重要な制御目的として、吊り荷を偏差なく目標値に追従させることが挙げられる。そこで本研究では、制御量 y を目標値 r に追従させるために状態変数に偏差の積分 $x_e = \int_0^t e(\tau) d\tau$ 、 $e = r - y$ を追加し、状態変数を $x(t) = [(q(t) - q(\infty))^T \ \dot{q}(t)^T \ x_e(t) - x_e(\infty)]^T$ 、操作量を $u(t) = u_p(t) - u_p(\infty)$ として拡大系を構成する。ただし、 $q(\infty)$ 、 $x_e(\infty)$ 、 $u_p(\infty)$ は定常値である。ま

た、信号の H_2 ノルムはその 2 乗面積を表しており過渡応答のよさを表す尺度に適しているため、制御性能の評価指標には H_2 ノルムを採用する [3] .

3.1 GS 制御系設計

一般に LPV システムの安定性はスケジューリングパラメータの変動範囲のみならず、その変化速度にも依存する . よって、スケジューリングパラメータの変化速度を考慮した設計を行うことで、考慮しない場合と比べて設計結果の保守性が改善できると考えられる . さらに、クレーンに対して状態空間表現の枠組みで GS 制御系設計を行う場合、制御入力行列にスケジューリングパラメータが含まれることや、 l^{-1} , \dot{l}^{-1} , \ddot{l}^{-1} という非線形な関数を形式的に線形なスケジューリングパラメータとして扱うため、設計結果が保守的になる傾向がある . これに対して本研究では、クレーンのディスクリプタ表現に対して、適切なディスクリプタ変数の導入と LFT を組み合わせることでスケジューリングパラメータを扱いやすい形で取り出す方法を示す . また、 l , \dot{l} , \ddot{l} に対してアフィンの LPV システムを構成し、パラメータ依存リアプノフ関数に基づく制御系設計を行う方法を示す .

設計に用いるスケジューリングパラメータ $\theta = [l, \dot{l}, \ddot{l}]^T$ とその変化速度 $\dot{\theta}$ の上下界を頂点とするパラメータボックスを式 (4) と与える .

$$\Theta = \{\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T : \theta_i \in \{\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i\}\} \quad (4)$$

$$\theta_1 = l, \theta_2 = \dot{l}, \theta_3 = \ddot{l}, \theta_4 = \ddot{\ddot{l}}, (i = 1, 2, 3, 4)$$

式 (2) から、ディスクリプタ表現の枠組みにおいて、クレーンは行列 E_p に変動パラメータを含むシステムであることがわかる . このような特徴を持つシステムに対して冗長なディスクリプタ変数を導入することで、計算可能な LMI 条件を導出できることが知られている [2] . 本研究では、ディスクリプタ変数を $x_G = [x^T \ \dot{q}^T]^T$ と与えることで、まず、式 (2) を式 (5) のように表現する .

$$E_G \dot{x}_G = A_G(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_1\theta_2, \theta_1^2)x_G + B_G u \quad (5)$$

$$E_G = \text{block diag}(I, I, 1, 0), J = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_1 \end{bmatrix}$$

$$A_G = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ -J & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & 0 & -E \end{bmatrix} \quad B_G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix}$$

式 (5) より、スケジューリングパラメータを行列 A_G に集約できていることがわかる . 次に、パラメータ依存リアプノフ関数を用いる場合に計算可能な LMI 条件を導出するために、行列 A_G を $\theta_1\theta_2$ と θ_1^2 を含まない形式に等価変換する . このような変換を行うためにスケジューリングパラメータを LFT で取り出す方法を適用する [2] . 本研究では、行列 A_G に含まれるスケジューリングパラメータの形に着目し、LFT 形式のスケジューリングパラメータ Δ を式 (6) と与え、行列 $A_G(\theta)$ を Δ を用いて式 (7) と表す .

$$\Delta = \text{diag}(\theta_1, \theta_1, \theta_1, \theta_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (6)$$

$$\Delta_1 = \text{diag}(\theta_1, \theta_1, \theta_1, \theta_1, \theta_1, 0, 0)$$

$$\Delta_2 = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, \theta_2, 0)$$

$$\Delta_3 = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, \theta_3)$$

$$A_G(\theta) = A_n + B_\delta \Delta (I - D_\delta \Delta)^{-1} C_\delta \quad (7)$$

このとき、式 (5) と等価なシステムは式 (8) で表現できる . ただし、パラメータ依存リアプノフ関数に基づく GS コントローラを設計することを考慮し、行列 $A_n, B_\delta, C_\delta, D_\delta$ がスケジューリングパラメータを含まないように変換する .

$$\begin{cases} E_G \dot{x}_G &= A_n x_G + B_\delta w_\delta + B_G u \\ z_\delta &= C_\delta x_G + D_\delta w_\delta \\ w_\delta &= \Delta z_\delta \end{cases} \quad (8)$$

$$A_n = \begin{bmatrix} A_{n11} & A_{n12} \\ A_{n21} & A_{n22} \end{bmatrix}, B_\delta = \begin{bmatrix} B_{\delta 1} \\ B_{\delta 2} \end{bmatrix}$$

$$C_\delta = \begin{bmatrix} C_{\delta 1} & C_{\delta 2} \end{bmatrix}$$

最後に、新たなディスクリプタ変数を $x_d = [x_G^T \ z_\delta^T]^T$ と与えることで、 x_d の係数行列 A_d に $(I - D_\delta \Delta)^{-1}$ という項を含まない形式に変換する . 以上の変換を行うことで、計算可能な LMI 条件を導出できる . 変換後のシステムは式 (9) と与えられる .

$$E_d \dot{x}_d = A_d(\theta)x_d + B_{du}u \quad (9)$$

$$A_d(\theta) = A_{d0} + \sum_{i=1}^3 \theta_i A_{di} \quad (10)$$

$$= \begin{bmatrix} A_n & B_\delta \Delta \\ C_\delta & -I + D_\delta \Delta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} A_{n11} & A_{n12} & B_{\delta 1} \Delta \\ A_{n21} & A_{n22} & B_{\delta 2} \Delta \\ C_{\delta 1} & C_{\delta 2} & -I + D_\delta \Delta \end{bmatrix}$$

$$E_d = \begin{bmatrix} E_G & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{du} = \begin{bmatrix} B_G \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.1.1 安定判別条件

本節からは式 (9) で表現されるディスクリプタシステムに対して状態フィードバック制御則 $u = K_d(\theta)x_d$ を与えた場合の閉ループシステムに対する安定判別条件と LQ 制御仕様を考慮した場合の条件について説明する . ただし本研究では、行列 E_d の構造を考慮しリアプノフ行列 $X_d(\theta)$ と変数行列 $Y_d(\theta)$ の候補を次の形に制約する .

$$X_d(\theta) = \begin{bmatrix} X(\theta) & 0 & 0 \\ X_{21}(\theta) & X_{22}(\theta) & X_{23}(\theta) \\ X_{31}(\theta) & X_{32}(\theta) & X_{33}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$E_d \dot{X}_d(\theta) = \begin{bmatrix} \dot{X}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Y_d(\theta) = \begin{bmatrix} Y(\theta) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[定理] (参考文献 [2]) 式 (9) のシステムが安定であるための十分条件は、式 (11), (12) を満足する $X(\theta)$, $X_d(\theta)$, $Y_d(\theta)$ が存在することである。

$$X(\theta) = X(\theta)^T > 0 \quad (11)$$

$$\text{He}\{A_d(\theta)X_d(\theta) + B_{du}Y_d(\theta)\} - E_d\dot{X}_d(\theta) < 0 \quad (12)$$

式 (12) の左右からそれぞれ、 $[I \ B_\delta\Delta(I - D_\delta\Delta)^{-1}]$ とその転置をかけると式 (13) を得る。

$$\text{He}\{A_G(\theta)X(\theta) + B_G Y(\theta)\} - \dot{X}(\theta) < 0 \quad (13)$$

従って、式 (12) における $X(\theta)$ は、元のディスクリプタ表現におけるリアプノフ行列ということがわかる。式 (13) には LFT 形式のスケジューリングパラメータ Δ とパラメータ依存リアプノフ行列 $X(\theta)$ の積が存在するが、式 (12) にはこの積が存在しない。また、 Δ と $X_{31}(\theta)$, $X_{32}(\theta)$, $X_{33}(\theta)$ との積が存在するが、 $X_d(\theta)$ を式 (14) の形で与え、 X_{31i} , X_{32i} , X_{33i} に対して式 (15) の制約を与えることで、式 (12) は θ に対してマルチアフィンとなる。これはスケジューリングパラメータ θ とその変化速度 $\dot{\theta}$ の端点で LMI 条件を解くことにより、安定性を保証できることを意味する。

$$X_d(\theta) = \hat{X}_{d0} + \sum_{i=1}^3 \theta_i \hat{X}_{di} \quad (14)$$

$$\hat{X}_{di} = \begin{bmatrix} X_i & 0 & 0 \\ X_{21i} & X_{22i} & X_{23i} \\ X_{31i} & X_{32i} & X_{33i} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_i [X_{31i} \ X_{32i} \ X_{33i}] = 0, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (15)$$

3.1.2 LQ 制御仕様

式 (9) のシステムに対して、LQ 制御仕様を考慮した場合の一般化制御対象を式 (16) と与える。

$$\begin{cases} E_d \dot{x}_d = A_d(\theta)x_d + B_{dw}w + B_{du}u \\ z = C_d x_d + D_d u \end{cases} \quad (16)$$

$$B_{dw} = \begin{bmatrix} B_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_d = \begin{bmatrix} W_x & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_d = \begin{bmatrix} 0 \\ R^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}, \quad W_x = \begin{bmatrix} Q^{\frac{1}{2}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

ただし、 w はインパルス外乱入力、 z は評価出力、 Q は状態変数 x に対する重み行列、 R は制御入力 u に対する重みである。ここで、式 (16) のシステムの w から z までの H_2 ノルムが式 (17) で与えられるとする。

$$\|G_{zw}\|_2^2 = \int_0^\infty z(t)^T z(t) dt \quad (17)$$

式 (17) の $\|G_{zw}\|_2^2$ を最小化するには、以下の条件を満足する最小の γ を求めればよい。

$$X(\theta) = X(\theta)^T > 0 \quad (18)$$

$$\text{He}\{A_d(\theta)X_d(\theta) + B_{du}Y_d(\theta)\} - E_d\dot{X}_d(\theta) + \{C_d X_d(\theta) + D_d Y_d(\theta)\}^T \{C_d X_d(\theta) + D_d Y_d(\theta)\} < 0 \quad (19)$$

$$B_w^T X(\theta)^{-1} B_w < W \quad (20)$$

$$\text{Trace}(W) < \gamma^2 \quad (21)$$

ここで、行列 $A_d(\theta)$, $X_d(\theta)$, $X(\theta)$, $Y_d(\theta)$, $Y(\theta)$, $\dot{X}_d(\theta)$ はスケジューリングパラメータとその変化速度に対してアフィンであるので、以下のパラメータボックス頂点 Θ_i で端点行列として表現できる。

$$X(\theta) = X_0 + \sum_{i=1}^3 \theta_i X_i \quad (22)$$

$$Y_d(\theta) = Y_{d0} + \sum_{i=1}^3 \theta_i Y_{di} \quad (23)$$

$$Y(\theta) = Y_0 + \sum_{i=1}^3 \theta_i Y_i \quad (24)$$

$$\dot{X}_d(\theta) = \sum_{i=1}^3 \dot{\theta}_i \hat{X}_{di} = X_d(\dot{\theta}) - \hat{X}_{d0} \quad (25)$$

$$\Theta_1=(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4), \Theta_2=(\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4), \Theta_3=(\theta_1, \bar{\theta}_2, \theta_3, \theta_4), \Theta_4=(\theta_1, \theta_2, \bar{\theta}_3, \theta_4)$$

$$\Theta_5=(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \bar{\theta}_4), \Theta_6=(\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4), \Theta_7=(\bar{\theta}_1, \theta_2, \bar{\theta}_3, \theta_4), \Theta_8=(\bar{\theta}_1, \theta_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4)$$

$$\Theta_9=(\theta_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \theta_4), \Theta_{10}=(\theta_1, \bar{\theta}_2, \theta_3, \bar{\theta}_4), \Theta_{11}=(\theta_1, \theta_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4)$$

$$\Theta_{12}=(\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \theta_4), \Theta_{13}=(\theta_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4), \Theta_{14}=(\bar{\theta}_1, \theta_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4)$$

$$\Theta_{15}=(\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \theta_3, \bar{\theta}_4), \Theta_{16}=(\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4)$$

式 (16) で表されるアフィン LPV システムを、スケジューリングパラメータ θ とその変化速度 $\dot{\theta}$ の変動範囲内において安定化し、 w から z までの H_2 ノルムを最小化する状態フィードバック GS コントローラを求めるための LMI 条件は式 (26)-(30) で与えられる。ただし、 $S_d(\dot{\theta}) = \text{block diag}(X(\dot{\theta}) - X_0, 0, 0)$ とする。

$$\text{minimize} : \gamma \quad (26)$$

$$\text{subject to} : X(\Theta_i) > 0 \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} \text{He}\{A_d(\Theta_i)X_d(\Theta_i) + B_{du}Y_d(\Theta_i)\} - S_d(\Theta_i) \\ C_d X_d(\Theta_i) + D_d Y_d(\Theta_i) \\ \{C_d X_d(\Theta_i) + D_d Y_d(\Theta_i)\}^T \\ -I_d \end{bmatrix} < 0 \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} W & B_w^T \\ B_w & X(\Theta_i) \end{bmatrix} > 0 \quad (29)$$

$$\text{Trace}(W) < \gamma^2 \quad (30)$$

$$(i = 1, \dots, 16)$$

式 (26)-(30) を満たす $X(\Theta_i)$, $Y(\Theta_i)$ から $X(\theta)$, $Y(\theta)$ を得ることで、ディスクリプタ表現の枠組みにおけるパラメータ依存リアプノフ関数に基づく GS コントローラ $K_d(\theta)$ は式 (31) のように与えられる。

$$K_d(\theta) = \begin{bmatrix} Y(\theta)X(\theta)^{-1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

式 (26)-(30) において, $X(\theta_i)$, $Y(\theta_i)$ を単一とし, $S_d(\theta_i) = 0$ とすると, ロープ長の時間変化を考慮した固定ゲインのロバストコントローラが導出できる. また, $X(\theta_i)$ を単一とし, $Y(\theta_i)$ のみをパラメータに依存させ, $S_d(\theta_i) = 0$ とすると, 単一のリアプノフ関数に基づく GS コントローラが導出できる.

4 設計結果

設計結果を以下に示す. ただし, 実験機で再現可能なロープの巻き上げ動作を行うため, スケジューリングパラメータとその変加速度の上下界を $\theta_1 \in [0.1, 0.7]$, $\theta_2 \in [-0.28, 0.28]$, $\theta_3 \in [-2.66, 2.66]$, $\theta_4 \in [-131, 131]$ と与える.

4.1 H_2 ノルムを用いた制御性能の比較

ディスクリプタ表現の枠組みで単一のリアプノフ関数に基づき GS コントローラを設計した場合と, パラメータ依存リアプノフ関数に基づき GS コントローラを設計した場合の閉ループ系の H_2 ノルムの上界値を, コントローラを θ_1 に依存させた場合, θ_1, θ_2 に依存させた場合, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ に依存させた場合に分けて表 1, 2 に示す. ただし, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を不確かさとしてロバストコントローラを設計した場合の H_2 ノルムの上界値は 8.313 であった.

表 1 単一のリアプノフ関数に基づく設計結果

依存させるパラメータ	θ_1	θ_1, θ_2	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$
H_2 ノルム上界値	8.235	8.234	8.235

表 2 パラメータ依存リアプノフ関数に基づく設計結果

依存させるパラメータ	θ_1	θ_1, θ_2	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$
H_2 ノルム上界値	5.584	5.535	5.524

表 1, 2 から, パラメータ依存リアプノフ関数に基いた設計を行うことにより, 設計結果の保守性が改善できていることがわかる.

4.2 シミュレーション

本研究で設計したコントローラの有用性を検証するためにシミュレーションを行った. 目標値は吊り荷の位置 y に対して 0.5 [m] と与えた. また, ロープ長の時間変化に対してロバスト安定性を保証できていることを示すために, ロープ長を時間と共に変化させた. 巻き下げながら吊り荷の水平方向の位置決めを行った入出力結果を図 2, 図 3 に示す. 巻き上げながら吊り荷の水平方向の位置決めを行った入出力結果を図 4, 図 5 に示す. シミュレーション結果からロープ長が時変の場合でも安定化できており, 定常偏差なく目標値に追従していることがわかる. 以上から, 本提案法を用いることで, 安全性を維持し, 吊り荷の振動を抑制しながら, 高速で正確な運搬ができることが示された.

5 おわりに

本研究では, クレーンに対するロープ長の時間変化を考慮した制御系設計をディスクリプタ表現の枠組みにおいて行った. また, パラメータ依存リアプノフ関数に基づく GS 制御系設計を行うことで, 単一のリアプノフ関

数に基づく設計を行う場合に比べて設計結果の保守性を軽減できることを, H_2 ノルムを用いた設計結果の比較とシミュレーションにより示した.

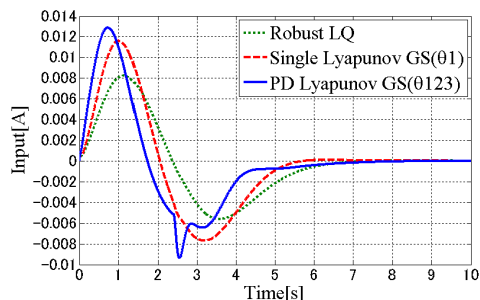


図 2 巻き下げ時の入力

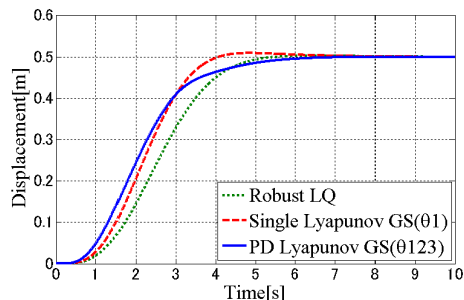


図 3 巻き下げ時の出力

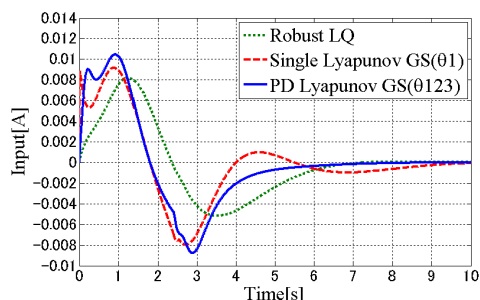


図 4 巻き上げ時の入力

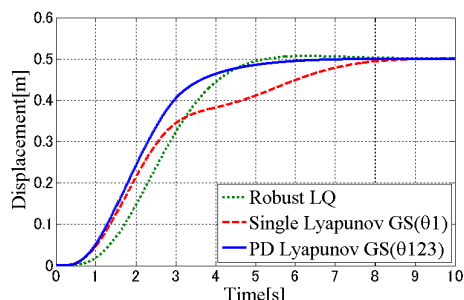


図 5 巻き上げ時の出力

参考文献

- [1] 増淵, 示村: ゲインスケジューリング系の設計におけるディスクリプタ形式の利用について, システム制御情報学会誌, 12-7, 390/394 (1999)
- [2] 陳, 柴田: ディスクリプタ表現の冗長性を利用したシステム解析, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, 47-5, 211-216 (2003)
- [3] M. Sato: Robust H_2 Problem for LPV Systems and Its Application to Model-Following Controller Design: Design Examples for Aircraft Motions, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-06-029E, 1/17 (2007)