

自己調整機能を持つスマート梁構造物の振動制御

Vibration Control of Smart Cantilever Structure with Self-Maintenance

○ 学 前田 裕 司 (岐阜高専 専攻科) 正 奥川 雅 之 (岐阜高専)

Hiroshi MAEDA and Masayuki OKUGAWA

Gifu National College of Technology,
Kamimakuwa, Shinsei-cho, Motosu-gun, Gifu, 501-0495

Key Words: Smart Structure, Self-Sensing, Piezoelectric Material, Vibration Control, Direct Transmission Part.

1. はじめに

本論文では、圧電素子を貼付することによってスマート化された柔軟梁構造物に関する振動制御問題について述べる。圧電素子の可逆特性を利用したセルフセンシング手法は、通常ブリッジ回路が用いられている¹⁾。本研究では、ブリッジ回路の平衡調整をシステム同定及び状態推定問題に帰着し、自己調整機能の実現を検討している²⁾。一般にセルフセンシングシステムは、直達項成分を有するシステムに表現され、直達項成分の摂動に対して、 \mathcal{H}_∞ 最適制御系を適用することによりロバスト安定性が補償されることが数値計算で示されている³⁾。そこで、筆者らの提案するセルフセンシングシステムに関して制御系の実装実験を行い、直達項の変動に対するロバスト安定性を検証する。

2. 自己調整機能を持つスマート梁構造物

2.1. 自己調整 本研究における自己調整とは構造物自身の不確実な物性変動（特に圧電素子の静電容量や振動系の固有振動数）変動に対するモデルおよび制御系の再調整機能のことである。構造物が内部状態を自己評価し、周囲の環境変化あるいは構造物自身の物性変化に対して適応するものである。ここでは、モデルの更新および制御系の再設計を構造物自身が実施することを意味する。

2.2. セルフセンシングシステム 本研究では、図1に示すような圧電素子を貼付した柔軟片持ち梁を用いている。また、セルフセンシングを実現するため、図2に示すように圧電素子に対してチャージアンプを用いた電荷計測回路を直列に接続し、圧電素子に生じた電荷量を計測する。外乱等によって生じた振動を抑制する場合、観測出力には制御入力とセンサ出力信号が混在するが、圧電素子と片持ち梁のダイナミクス構造に注目し、入出力関係をモデル化することにより、観測出力に含まれている状態量（梁のたわみ）を状態観測器（オブザーバ）を導入して推定する。本手法は、ブリッジ回路のように入出力信号を分離するのではなく、直達項を持つ動的システムとして扱う点を特徴としている。セルフセンシングシステムでは圧電素子の静電容量変化が直達項が摂動として表れる。その結果、セルフセンシング問題がシステム同定および状態推定問題に帰着できるというものである。

3. セルフセンシングシステムに対する制御系設計

3.1. LQ最適制御系 可制御および可観測性に関して、セルフセンシングシステム $\mathcal{P}(A_s, b_s, c_s, d_s)$ は、ともに満たしていることから、同一次元オブザーバ（ゲイン： L ）を設計し、状態変数の推定を行うことが可能である。さらに

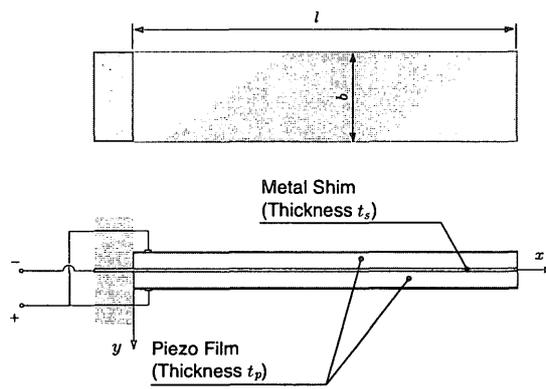


Fig. 1 Smart cantilever structure

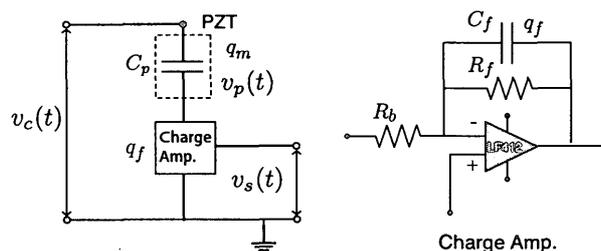


Fig. 2 Instrumentation circuit

推定された状態量をフィードバック（ゲイン： F ）することにより、このとき、コントローラ以下のように表される閉ループ系を構成する。

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = (A_s - Lc_s - b_s F + Ld_s F)\hat{x}(t) + Ly_s(t) \\ u(t) = -F\hat{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

$$F = R_f^{-1} B_s^T P_f, \quad L = R_o^{-1} P_o C_s^T$$

P_f , P_o は、次のハミルトン行列 H_{lq} , N_{lq} で定義される Riccati 方程式の安定化解である。また、重み行列 Q_f , Q_o , R_f , R_o は半正定対称行列である。

$$H_{lq} = \begin{bmatrix} A_s & -R_f^{-1} b_s b_s^T \\ -Q_f & -A_s^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$N_{lq} = \begin{bmatrix} A_s^T & -R_o^{-1} c_s^T c_s \\ -Q_o & -A_s \end{bmatrix}, \quad (3)$$

3.2. \mathcal{H}_∞ 最適制御系 最悪外乱 $w(t) = [w_1 \ w_2]^T$ に対して、 $\|G_{zw}\|_\infty$ を γ 以下にする出力フィードバックを用

いた \mathcal{H}_∞ 最適制御問題を考える.

$$\|G_{zw}\|_\infty < \gamma; \quad \gamma > 0 \quad (4)$$

式 (5a)~(5c) で表されるセルフセンシングシステムの場合、直達項を有することから、 \mathcal{H}_∞ 制御標準問題の仮定を満たさない。ここで、 Q , R , E , N は正定対称行列である。

$$\dot{x}(t) = A_s x(t) + E w(t) + b_s u(t) \quad (5a)$$

$$z(t) = Q^{\frac{1}{2}} x(t) + R^{\frac{1}{2}} u(t) \quad (5b)$$

$$y(t) = c_s x(t) + N w(t) + d_s u(t) \quad (5c)$$

\mathcal{H}_∞ 標準問題の仮定を回避するために観測出力を式 (6) のように \tilde{y} と再定義する。

$$\tilde{y}(t) = y(t) - d_s u(t) \quad (6)$$

このとき、一般化プラント $\tilde{G}(s)$ は、

$$\tilde{G}(s) \triangleq \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} A_s & E & 0 & b_s \\ \left[Q^{\frac{1}{2}} \right] & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ R^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \\ c_s & \begin{bmatrix} 0 & N \end{bmatrix} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となり、 \mathcal{H}_∞ 標準問題となる。したがって $\tilde{G}(s)$ に対するコントローラ $\tilde{K}(A_k, B_k, C_k, D_k)$ が得られる。以上より、最終的な制御器は次のように表される。

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = (A_k - B_k d_s C_k) \hat{x}(t) + B_k y(t) \\ u(t) = C_k \hat{x}(t) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、

$$A_k := \gamma^{-2} B_1 B_1^T X + B_2 C_k - B_k C_2, \quad B_k := -Z L_\infty,$$

$$C_k := -B_2^T X, \quad L_\infty := -Y C_2^T, \quad Z := (I - X Y / \gamma^2)^{-1}.$$

また、 X および Y は、ハミルトン行列 H_∞ および N_∞ で定義される Riccati 方程式の安定化解である。

$$H_\infty = \begin{bmatrix} A & B_1 B_1^T / \gamma^2 - B_2 B_2^T \\ -C_1^T C_1 & -A^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$N_\infty = \begin{bmatrix} A^T & C_1 C_1^T / \gamma^2 - C_2^T C_2 \\ -B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix}, \quad (11)$$

4. 実装実験

4.1. 実験方法 制御系設計の際に使用したモデルは部分空間同定法から得られる状態空間モデルを用いた(二次振動モードまで考慮)⁴⁾。実装実験は、LQ および \mathcal{H}_∞ 最適制御系を設計した、外乱として正弦波(周波数 33[Hz]、振幅 ± 5 [V])を1秒間入力し梁を励振させた後、制御を開始する。システムの直達項(Dゲイン)の変動に対して各制御系を用いて実験を行った。実際にDゲイン(圧電素子の静電容量)を意図的に変動させることは不可能なため、今回はチャージアンプ回路内のコンデンサ容量を440[nF]から220[nF]に変更させた。実験時のサンプリング周波数は1[kHz]とした。

4.2. 実験結果および考察 各制御系は、強安定性を満足するように設計した。図3(a)にノミナル状態に対する

実験結果を示す。制御入力に注目すると、LQ最適制御系よりも \mathcal{H}_∞ 最適制御系を適用した方がより少ないエネルギーで制振していることがわかる。また、Dゲイン変動に対する実験結果を図3(b)に示す。Dゲインをノミナル値($d_s = 0.6430$)から変動させた場合($d_s = 0.7739$)、Dゲインの摂動に対してLQ最適制御系では発散し、 \mathcal{H}_∞ 最適制御系では、ノミナル性能と比較して応答波形に変化は見られなかった。しかし、直達項を含むシステムの場合、(1)および(9)に示したコントローラの構造から、制御系の感度特性を上げることにより、強安定性が保障されなくなる傾向が見られた。このことにより、今回の設計方法では、制御性能の向上には限界があるものと考えられる。

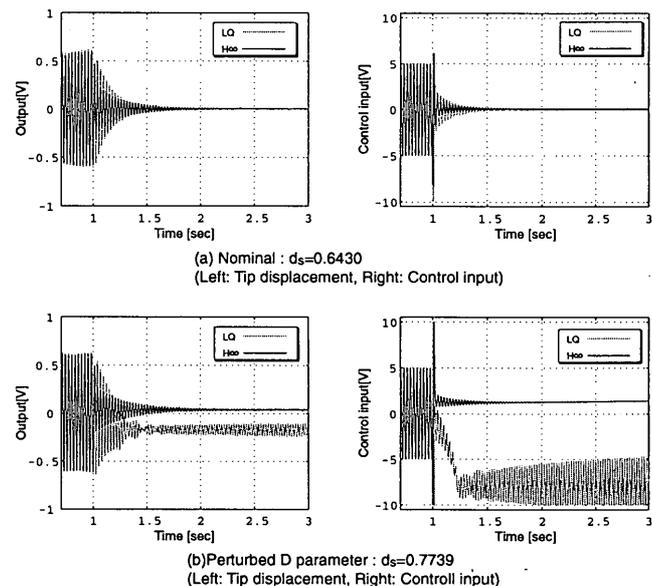


Fig. 3 Experimental results of the vibration control

5. まとめ

本実験により、セルフセンシングシステムの直達項成分に関する摂動に対してLQ最適制御系よりも \mathcal{H}_∞ 最適制御系の方が、ロバスト安定性に優れていることが確認された。しかし、制御性能に限界が見られることから、改善手法の検討が望まれる。一方で、広範囲の変動に対しては、ロバスト性を補償すると制御性能が犠牲になるため、自己調整によるモデルおよび制御系の更新によって、直達項成分の摂動に適応することが望まれる。

参考文献

- 1) Dosch, J. J., D. J. Inman, and E. Garcia, "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," J. Intell. Mater. Syst. and Struct., Vol. 3, pp. 166-185, 1992.
- 2) Okugawa, M. and M. Sasaki, "System Identification and Controller Design of a Self-Sensing Piezoelectric Cantilever Structure," Proc. SPIE, Vol. 4326, 2001, to be published.
- 3) 奥川雅之, 佐々木実, 「自己調整機能を有したスマート柔構造物の振動制御」, D&D講演会アブストラクト集, 2001. 掲載予定
- 4) 奥川雅之, 原幸人, 佐々木実, 「スマート化された柔軟梁に対する部分空間同定法の適用」, 第45回ISCIE研究発表講演会講演論文集, pp. 375-376, 2001.