

基調講演 振動制御のためのスマート構造の設計

梶原逸朗

(東京工業大学)

Design of Smart Structure for Vibration Control

Itsuro Kajiwara

(Tokyo Institute of Technology)

Key Word: Vibration, Active Control, Finite Element Method/ Optimization, Modal Analysis, Smart Structure

1. 緒言

本論文では、振動制御の機構としてスマート構造を用い、諸性能の向上を達成すべく、構造の形状と制御の設計手法を提案・開発する。同時に、有限要素法 (FEM) とモード解析に基づく低次元モデル化およびモード制御法を示し、実験による検証を行う。スマート構造に関しては、技術的な動向や評価に関する解説⁽¹⁾、圧電素子・フィルムを用いた片持ち梁の過渡振動応答の制御⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、圧電フィルム特性の定式化および剛性の評価⁽⁵⁾、モード形を考慮した圧電素子による振動制御⁽⁶⁾、圧電素子により駆動される柔軟グリッパーの力制御⁽⁷⁾、振動制御効果の向上を目指した圧電素子の最適設計⁽⁸⁾⁽⁹⁾、圧電素子を用いた振動と位置のトラッキング制御⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾等が研究されている。スマート構造には、それ自身にセンサ/アクチュエータ機能を有しており、構造形状を含めた機構設計と制御系設計を融合する意義は大きく、高性能化の達成が期待できる。本研究では、スマート化の基礎となるセンサおよびアクチュエータを圧電フィルムにより構成する⁽³⁾。圧電フィルムは非常に軽薄な高分子材料であるため、貼付する構造物の特性をほとんど変化させることがなく、取り付けが容易であり、柔軟構造のスマート化に適している。固定部を要しないセンサとして、圧電フィルムの他に加速度センサを用いる場合についても検討する。FEMにより構造をモデル化し、モード座標に基づく低次元化を行い、 H_2 仕様により制御系を設計する。この際、可制御性グラム行列に基づく指標により、適切なアクチュエータ配置を選定する。制御量として出力変位を評価する変位制御と、モード座標を評価するモード制御法について示す。 H_2 性能の向上を目指した設計問題を定義し、構造の形状と制御系を同時に最適化する。シミュレーションおよび実験を行い、達成される振動抑制効果および同時最適化の有効性を評価する。

2. 対象構造およびモデル化

本研究で対象とする構造は、図1に示す一端固定の梁とする。同図に示すように、片面にアクチュエータ用の圧電フィルム(PVDF:ポリフッ化ビリニデン)が貼付されており、反対の面に観測出力(センサ)用の圧電フィルムもしくは加速度センサが取り付けられている。圧電フィルムは呉羽化学製KFピエゾフィルムで、厚さは $40\mu\text{m}$ である。非常に薄い接着層により、構造上にフィルムが貼付されている。本研究では、FEMを用いることにより、任意形状の構造に対し、スマート構造のモデル化および後述の制御系設計を可能にする。

2.1 制御対象の記述

n 自由度システムの運動方程式を次式として記述する。

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = B_{1s} w + B_{2s} u \quad (1)$$

ここで、 M_s 、 C_s および K_s はそれぞれ質量行列、減衰行列および剛性行列である。 C_s は比例粘性減衰を仮定する。 x 、 w および u はそれぞれ変位、外乱および制御入力ベクトルである。次に、モード座標変換 $x = \Phi \xi$ を用いて制御系を設計するための低次元システムを作成する。低次元化後の状態方程式は次式となる。

$$\dot{q} = Aq + B_1 w + B_2 u \quad (2)$$

ここで、

$$q = \begin{Bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Lambda & -\Phi^T C_s \Phi \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T B_{1s} \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T B_{2s} \end{bmatrix}$$

Λ は系の固有値を対角上に並べた行列で、固有ベクトルは質量行列に対し正規化されている。行列 B_{2s} は、制御入力 u と圧電フィルムにより構造の先端点に作用するモーメントの関係により決定できる。これらの関係は、次節で述べるCrawleyとde Luisの定式化⁽⁵⁾を参照することにより、簡単な比例関係として表現できる。また、出力方程式を次式として記述する。

$$y_2 = C_2 q + D_{21} w + D_{22} u \quad (3)$$

本研究では、式(3)の観測出力として、圧電フィルムセンサ出力もしくは加速度センサ出力を用いる。圧電フィルムセンサ出力については、出力電圧 V_s に比例する先端点の z 軸まわりの回転変位 $y_s (= a_s V_s)$ が検出されるものとする。回転変位 y_s を状態 $q_0 = (x^T, \dot{x}^T)^T$ を用いて $y_s = C_0 q_0$ で表すと、式(3)の係数行列は次のようになる。

$$C_2 = C_0 \Psi, \quad D_{21} = 0, \quad D_{22} = 0, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ 0 & \Phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

一方、加速度出力の場合、モード座標における加速度は

$$\ddot{\xi} = -\Phi^T C_s \Phi \dot{\xi} - \Lambda \xi + \Phi^T B_{1s} w + \Phi^T B_{2s} u \quad (5)$$

で表されることより、検出加速度を $y_s = C_s \ddot{x}$ とすると、式(3)の係数行列は次のようになる。