

# I-180 柔軟構造物の能動型制御におけるスピルオーバー対策

長岡技術科学大学 正会員 ○川谷 亮治  
 長岡技術科学大学 正会員 松嶋 博英  
 長岡技術科学大学 正会員 鳥居 邦夫  
 長岡技術科学大学 正会員 池田 清宏  
 (株) 横河ブリッジ 正会員 寺田 博昌

## 1 はじめに

柔軟構造物の低次モード振動に対する能動型制振制御を行う場合、制御系設計の際に無視した高次モードを励振することによって発生するスピルオーバーという不安定現象により、アクチュエータの性能を最大限に活用できなくなることが問題となる。本報告では、柔軟構造物の一つである橋梁に対して、1) 制御系の不可制御・不可観測性の利用、2) オブザーバゲインの適切な選択、によるスピルオーバー対策を取り入れた安定化制御器の設計法を提案する。

## 2 制御対象と状態空間モデル

スパン長3mの単純桁に電磁式アクチュエータと加速度センサを取り付けた図1に示すような制御系を考える。この桁に対して、モード解析法を利用してモデルを作成し、アクチュエータの動特性(2次)も考慮して制御系全体の状態空間モデルを求めると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu && \text{状態方程式} \\ y &= Cx + Du && \text{出力方程式} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$  は各モードの変位と速度ならびにアクチュエータに対応した状態量、 $u(t)$  はアクチュエータが発生する制御力、 $y(t)$  はセンサ設置点における加速度である。また、 $A, B, C, D$  は適当な大きさを持つ定数行列である。

## 3 最適レギュレータ法

本報告では、最適レギュレータ法を利用して、評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + r u^2) dt \quad (2)$$

を最小化するように最適制御力  $u(= -Kx)$  を決定する。このとき制御後のシステムの状態方程

式は次式で与えられる。

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (3)$$

ところで、式(1)からわかるように、制御に利用できるのは観測量  $y$  だけであるので、全状態オブザーバを利用して状態量の推定を行ない、その推定値に基づき最適制御力を算出する。制御器の構成は、式(4)で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= (A - HC)\hat{x} + (B - HD)u + Hy \\ u &= -K\hat{x} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $H$  はオブザーバゲインと呼ばれる行列である。

## 4 安定化コントローラの設計

### 4.1 設計パラメータ $Q$

最初に、式(2)中の設計パラメータ  $Q$  の選定法について検討する。ここでは、 $Q$  を対角行列に限定し、 $r = 0.1$  とする。図2は、(a)  $Q$  の対角要素をすべて100、(b) 各モードの速度に対応した  $Q$  の対角要素を2000(残りは100)としたときの式(3)の  $A - BK$  の固有値を複素平面上にプロットしたものである。図2より、速度に対応した重みを大きくすることによって、制振性能を高めることが可能であることがわかる。

### 4.2 スピルオーバーの対策

次に、スピルオーバー対策について検討する。

#### (1) 不可制御・不可観測性の利用

例えば、1次モード振動を制振する目的で1次モードのみを考慮した設計モデル(式(1))を作成したとする。このとき、2次以上のモードの影響により系が不安定となる可能性が生じる。この場合、アクチュエータを中央にそしてセンサを1/3地点(3次モードの節)に設置すれば、1次モードを最も効率よく制振できる

とともに、2次並びに3次モードがそれぞれ不可制御、不可観測となるために、これらのモードにより不安定現象が生じることはない。

(2) オブザーバゲインの選定

モデルが正確に得られる場合には、(1)の方法も有効であるが、橋梁のような複合構造物の場合、2次あるいは3次モード以上のモデルに対して必ず不確かさが伴う。これがスピルオーバーの原因となる。スピルオーバーは、不確かさを制御器が励振することによって生じる現象であるから、不確かさの程度の大きい周波数領域で制御器のゲインが低くなるようにすればよい。例えば、2次モードまで制振することを考え、2次モードまで正確なモデルが得られたとする。この場合、3次以上のモードに対応した制御器のゲインを低くすればよい。その一つの方法が、式(4)中の  $A-HC$  の極を、開ループ系の極を実軸に平行に移動した地点（図3参照）に配置するようにオブザーバゲインを設計する方法である。このときの制御器のゲイン特性を図4に示す。また、閉ループ系の応答特性を図5に示すが、スピルオーバーを発生することなく、1次ならびに2次モードの制振が良好に行なわれていることがわかる。

5 まとめ

本報告では、柔軟構造物（橋梁）の制振制御の際のスピルオーバー対策を提案した。なお、ここで提案した方法は、アクチュエータが十分な制振力を発生することができる場合には、対応には限界があるので、その場合は、ローパスフィルタの利用や  $H_\infty$  制御による周波数整形<sup>1)</sup>を利用すればよい。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、長岡技術科学大学の丸山、矢鍋、高橋先生と卒業生の太田雄一氏には多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

[1] 松嶋博英, 川谷亮治, 鳥居邦夫, 寺田博昌:  $H_\infty$  制御理論に基づく橋梁のロバスト制振制御, ROBOMECH'92

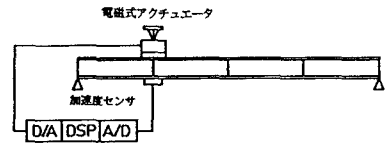


図1 制御対象

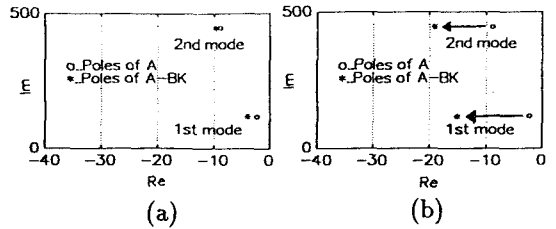


図2 閉ループ系の極

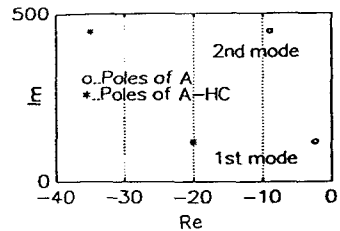


図3  $A-HC$  の極

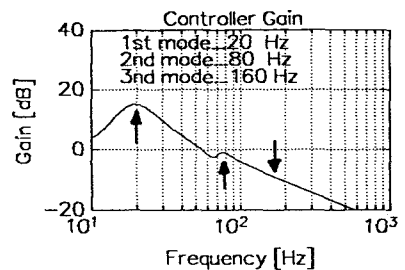


図4 制御器のゲイン特性

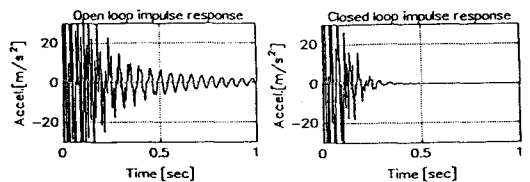


図5 開・閉ループ系のインパルス応答