1403 スピルオーバー最小化基準に基づくモードセンサ・アクチュエータの最適設計

The Optimal Design of Modal Sensor/Actuator Based on the Spillover Minimization Criterion

○正 川畑 成之 (阿南高专) 正 福永 久雄 (東北大学)

Nariyuki KAWABATA, Anan College of Technology, 265 Aoki, Minobayashi-cho, Anan, Tokushima
Hisao FUKUNAGA, Tohoku University

Key Words: Optimal Placement, Vibration Control, Modal Sensor, Modal Actuator, Accelerometer

1 緒言

近年,構造にセンサ・アクチュエータを組み込むことによって構造物の形状や振動を制御する知的構造物の研究^{1~3)}が行われている。しかし従来の手法は,構造全体にフィルム状のセンサを貼付する必要がある等,大規模・複雑な構造への拡張が困難であり,より簡易で高精度な手法が求められている。そこで本研究では大規模・複雑な構造への拡張が容易な手法として,加速度センサおよびPZT圧電アクチュエータを用いたモードセンサ・モードアクチュエータを検討する。センサ・アクチュエータのスピルオーバー最小化基準に基づく最適配置によって,モードセンサ・アクチュエータを最適設計する。本報ではCFRP積層板を対象にして,数値シミュレーションおよび振動制御実験結果より本研究の有効性を示す。

2 定式化

2.1 センサ最適配置

本研究では次式に示すセンサ最適配置目的関数¹⁾を最小にするようにセンサを配置することで,計測対象モードに対して未計測モードが影響する誤差,すなわち観測スピルオーバーが最小となるようにする。

$$J_s = \min \lambda_{\max} \left(\left(\overline{\Phi}_{spill1} \right)^T \left(\overline{\Phi}_{spill1} \right) \right) \quad (1)$$

ここで, $\left(\overline{\Phi}_{spill1} \right)$ は観測スピルオーバーのうち主要な計測対象モードに対して影響する成分を並べたマトリックスであり,構造の固有モードマトリックスより求められる。

2.2 アクチュエータ最適配置

本研究では,モードアクチュエータをPZTアクチュエータによって構築する。制御力はPZTが貼付された箇所において,面内方向に発生するものとする。センサ最適配置の場合と同様に,制御スピルオーバーを最小とするためのアクチュエータ最適配置目的関数¹⁾を次式で定義する。

$$J_a = \min \lambda_{\min} \left(\left[B_p \right] \right) \quad (2)$$

ここで, $\left[B_p \right] = \left(\left[B_c \right]^T \right)^T \left[B_r \right] \left[B_r \right]^T \left[B_c \right]$ であり, $\left[B_c \right]$ および $\left[B_r \right]$ はそれぞれ制御対象モードおよび残余モードに関する制御入力モード制御力関係マトリックスを表し,有限要素法より求められる。

式(2)に基づいて構築したモードアクチュエータを用い, LQR制御則によって,各モード別に振動制御を行う。

3 シミュレーションによる検証

3.1 数値モデル

図1は[0/45/-45/90]_sCFRP積層板試験片を示している。図中,黒塗りで示された箇所は固定箇所を表し, θ は積層板

の繊維角度を表している。また,★は実験における初期変位点及び面外変位計測点を表しており,初期変位点に1mmの初期変位を与え瞬間的に解放することで平板を加振する。本研究では試験片を図1に示すように10×10の有限要素領域に分割し,センサは格子節点上に,アクチュエータは要素上にそれぞれ貼付されたとした。表1にCFRP一方向材の材料定数を示す。ただし表1中厚さは8層分の値を示している。なお,試験片の数値モデルは古典積層理論に基づいて構築した。また,センサの質量・剛性は微小であるとして無視し,アクチュエータは表1に示す材料定数を用いてモデル化した。

3.2 センサ・アクチュエータ最適配置

図2にセンサ,図3にアクチュエータの最適配置結果を示す。ここでセンサは4個,アクチュエータは4個及び2個用いる場合の最適配置結果を示す。図2(b)および図3(c)は比較のため単純な規則にしたがって配置した基準配置箇所を示している。なお最適配置箇所の探索は全配置候補箇所に対するパラメトリックな計算によって行った。センサ最適配置においては,観測スピルオーバーを5次~20次モード,アクチュエータ最適配置においては,制御スピルオーバーを5次~8次モード(アクチュエータ4個),または3次~8次モード(アクチュエータ2個)とした。なお,本実験で用いたPZTアクチュエータでは,高次の振動がほとんど励起されないため,制御スピルオーバーの次数を低くすることで,低次のモードに対する制御効果が出る限り高くなるようにした。

Fig.1. Experimental specimen

Table 1 Material properties

CFRP				
E_{11}	E_{22}	G_{12}	ν_{12}	
GPa	GPa	GPa		
110	9.6	4.9	0.30	
ρ	Thickness	Damping		
kg/m ³	mm	α	β	
1541.0	1.26	0.35	2.0e-6	
PZT				
d_{31}	E	ν	ρ	Thickness
pm/V	GPa		kg/m ³	mm
-185	63.0	0.30	7700.0	1.0

Fig.2 Optimal and Reference locations of sensors

(c) Reference location (Na=2)

Fig.3 Optimal and Reference locations of actuators

Fig.4 Results of Numerical Simulation of Vibration Control
(four sensors and four actuators)

3.3 センサ配置箇所による制振性能比較

センサ配置箇所による制振性能の比較を数値シミュレーションによって行う。アクチュエータを図3(a)に示した最適配置箇所に配置し、センサを図2に示した最適配置箇所および基準配置箇所に配置した場合に関して、振動制御を行った結果を図4に示す。図4より、センサを最適配置箇所に配置した場合には速やかに振動が抑制されているが、基準配置箇所に配置した場合には振動が発散していることがわかる。以上の結果より、安定した振動制御を行うためにはセンサを最適配置することによって、高精度のモードセンサを構築することが重要であることがわかる。

4 実験による検証

4.1 実験装置

図5に本研究で用いる実験装置を示す。図中加速度センサの応答をチャージアンプによって増幅し、PC上に構築したコントローラによって制御力を計算した後、 piezoelectric driver を通して PZT 素子を駆動する。図中のレーザー変位計は、平板角の面外方向変位を計測するために設置されている。以上の装置により CFRP 積層板の振動制御を行う。なお、コントローラの前段にデジタルハイパスフィルタを適用し、加速度センサの低周波応答成分を除去している。また、チャージアンプの最大出力電圧は±75Vとなっている。

Fig.5 Experimental Setup

Fig.6 Experimental Results of Vibration Control
(four sensors and two actuators)

4.2 アクチュエータ配置箇所による制振性能比較

ここでは、振動制御実験によってアクチュエータ配置箇所による制振性能の比較を行う。平板の角(図1★)に1mmの初期変位を与え、瞬間的に解放して平板を加振し、1次モードと2次モードを同時に制御した結果を図6に示す。ここで、制御結果は初期変位点における面外方向変位の時間履歴で示した。(a)はアクチュエータを図3(b)に配置した場合、(b)は図3(c)に配置した場合の結果を示している。センサはどちらの場合も図2(a)の最適配置箇所に配置した。図中太線はPZTに制御入力を与えたClosed-loopの場合、細線は制御入力を与えないOpen-loopの場合の結果を示している。図6(a)と(b)の比較より、アクチュエータを最適配置した場合には速やかに振動を抑制することが可能となっているが、アクチュエータが適当に配置される場合には振動をほとんど抑制できていないことが分かる。以上の結果から、センサ配置と同様にアクチュエータ配置も制振性能に大きく影響することが明らかとなった。

5 結言

本研究では、知的構造物の構築を目的としたモードセンサ・モードアクチュエータの最適設計について検討した。その中で、加速度センサおよびPZTアクチュエータをスビルオーバー最小化基準に基づいて配置箇所の最適化を行い、数値シミュレーションおよび実験によって制振性能の検討を行った。それらの結果より、本研究で提案したセンサ・アクチュエータの最適配置によって、少数のセンサ・アクチュエータを用いる場合でも速やかな振動の抑制が可能となることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Sun, D. et al., *AIJAA J.*, 39-9 (2001), 1766-1772.
- 2) Lee, C., K. and Moon, F., C., *J. Appl. Mech.*, 57 (1990), 434-441.
- 3) Kim, J. et. al., *AIJAA J.*, 39-10 (2001), 1969-1976.