スマートフィルムセンサ・アクチュエータを用いた平板構造物の
モード制御に関する研究*米 山 聡^{*1}, 田 中 信 雄^{*2}, 岩 本 宏 之^{*1}Modal Control of a Planar Structure
Using Smart Film Sensors and ActuatorsSatoshi YONEYAMA^{*3}, Nobuo TANAKA and Hiroyuki IWAMOTO^{*3} Department of Aerospace Engineering, Tokyo Metropolitan University,
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

This paper deals with modal control of one-dimensional planar structures using both distributed-parameter film sensors and actuators with a view to extracting as well as suppressing the designated structural vibration mode. First the fundamental properties of a modal control system based upon distributed-parameter sensors and actuators are discussed. It is shown that the utilization of distributed-parameter sensors and actuators leads to the elimination of spillover destabilization. A photo-resist technique on electrode patterning of a PVDF film and a laminating technique are then introduced, hence termed a multi-layer PVDF film. The use of the multi-layer PVDF film *per se* is found to possess the potential of modal control. Furthermore, a multi-layer PVDF film-based one-dimensional planar structure is developed, which has the attribute of modal control. The experiment is finally conducted, demonstrating the capability of modal control for suppressing the structural mode of interest without causing any spillover effect on the other structural modes.

Key Words: Flexible Structure, Sensor, Smart Material, Smart Structure, Vibration Control

1. 結 言

能動振動制御を支えているモード制御は、対象構造物の固有関数がもつ直交性を利用することにより、応答にあずかる各固有モード成分を分離し、各モードに単一フィードバック系を構築することで各モードにダンピングを付与したり、モード制御を講ずることで所望のモード姿態を創造する制御である。これまでにモード制御に関する多くの報告がなされているが^{(1)~(4)}、制御系構築の基礎となる振動情報採取及び励起にはポイントセンサやポイントアクチュエータが使用されているといえる。そのため、振動モードが無限個存在するような分布定数系構造物を対象とする場合、少なくとも対象とする周波数領域に存在する振動モード数の数倍程度のポイントセンサ、またはロバスト性を考慮した新たな制御系の構築が必要となる。そのため簡素な制御系においては、データの欠落や観測スピロ

バを引き起こし、同様にポイントアクチュエータを使用することで制御スピロバが発生することは自明である。結果として、制御系の安定性は害されるだけでなく、制御対象構造物は無数のセンサとアクチュエータに取り囲まれた構造物となる。これに対し、ポイントセンサ/アクチュエータが無限個集積しているものとみなせる分布定数系センサ/アクチュエータを導入することで、必要とするセンサおよびアクチュエータの減少とスピロバ問題の回避を達成することができる^{(5)~(9)}。そこで筆者らは、これまでにPVDFフィルムを基調とした分布定数系センサ/アクチュエータの設計手法に関する提案及び実験による検証を行い、単純支持平板の特定モード検出/励起及びスピロバを回避した制御が可能であることを報告している^{(10)~(15)}。しかしながら、PVDFフィルムを基調とした平板の振動制御は、所望の形状にシェーピングしたPVDFフィルムをアルミ板等の剛直な支持体に貼付する手法であった。そのため、(1)シェーピング及び貼付け誤差及び面内の質量分布による性能劣化、(2)支持体の厚さ及び剛直性による産業上の適用範囲の制約、(3)一枚のフィルムから切り出し可能な形状及び枚数の制約による材料得率の大幅な低下と大面積化の困難性、など

* 原稿受付 2009 年 7 月 27 日。

^{*1} 正員, 首都大学東京大学院システムデザイン研究科(〒191-0065 日野市旭が丘 6-6)。^{*2} 正員, フェロー, 首都大学東京システムデザイン学部。

E-mail: yoneyama-satoshi@sd.tmu.ac.jp

のように性能面及び工業面の両面で改良すべき点が多々あったといえる。

このような問題点を解決する手法の一つとして、筆者らは電極パターンニング手法を用いたスマートフィルムの創生手法を提案している^{(16)~(18)}。本手法はシェーピング及び剛直な基板に貼り付けることなく、僅か数百 μm の柔軟な薄膜フィルムそのものに、モードフィルタリング機能やモードアクチュエーション機能を内蔵できる。また本フィルムは PZT を代表とするポイントセンサ・アクチュエータと異なり、高い柔軟性と加工性を有していることから、積層化等の多機能化や大面積化を容易に達成できる。このことはセンサ機能とアクチュエータ機能など、複数の機能を一枚のフィルムに内蔵できることを意味している。このようなポリマー固有の特徴を最大限に活かすことで、柔軟性/薄層性/加工性を有する、モード制御フィルムが構築可能である。そこで本論文では二次元分布定数系センサフィルムおよびアクチュエータフィルムを基調とするモード制御系を構築し、その効果を立証することを目的とする。まずは本論文で対象とする分布定数系センサおよびアクチュエータを使用した場合のモード制御について明らかにすることからはじめる。さらに次元平板状構造物を対象とし、センサフィルムとアクチュエータフィルムを融合した薄層フィルムを用いてフィードフォワード制御系を構成し、モード制御効果を検証する。このことにより、本論文で提案する極薄膜なモード制御フィルムの機能が確認できたので、当該フィルムの系統的な設計法及び作製法について明示する。

2. 分布定数系センサと分布定数系アクチュエータをベースとするモード制御

二次元非減衰分布定数系構造物の基礎式として、領域 S において次の偏微分方程式を考える。

$$L[w(r,t)] + m(r)\ddot{w}(r,t) = f(r,t) \quad (1)$$

ただし、 r は構造物の任意点における座標(x, y)、 $w(r, t)$ および $\ddot{w}(r, t)$ は r における振動変位および加速度、 $m(r)$ は質量密度、 $f(r, t)$ は分布制御力、 L は自己随伴微分演算子を表す。すると、 $w(r, t)$ および $f(r, t)$ はモード関数 $\varphi_k(r)$ 及びモード係数 $\eta_k(t)$ ($k=1,2,3,\dots$) を用いて、以下のように記述することができる。

$$w(r,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(r) \eta_k(t) \quad (2)$$

$$f(r,t) = \sum_{k=1}^{\infty} m(r) \varphi_k(r) f_k(t) \quad (3)$$

さらにモード関数 $\varphi_k(r)$ は演算子 L および $m(r)$ に関し、正規化されているものとする。

$$\int_S \varphi_r(r) L[\varphi_s(r)] dr = \omega_r^2 \delta_{rs} \quad (4)$$

$$\int_S \varphi_r(r) m(r) \varphi_s(r) dr = \delta_{rs} \quad (5)$$

ここで ω_r は r 次のモード周波数、 δ_{rs} はクロネッカーデルタを表す。すると $\eta_k(t)$ および $f_k(t)$ は次のように記述できる。

$$\eta_k(t) = \int_S \varphi_k(r) m(r) w(r,t) dr \quad (6)$$

$$f_k(t) = \int_S \varphi_k(r) f(r,t) dr \quad (7)$$

次に分布定数系構造物を対象とし、分布定数系センサおよび分布定数系アクチュエータで構成されるモード制御系を考える。具体的な設定として、 s 次モードのみに着目して、これにダンピングを付与する問題をとりあげる。すなわち、分布定数系センサは s 次の速度モード係数のみをセンシングし、分布定数系アクチュエータは s 次の振動モードのみを励起する構成とする。すると分布制御力は次のように記述できる。

$$f(r,t) = -g_s m(r) \varphi_s(r) \dot{\eta}_s(t) \quad (8)$$

ここで、 g_s はモード制御ゲインを表す。次に上式を振動方程式に代入し、この両辺に $\varphi_i(r)$ を乗じ、さらに領域 S にわたって積分すると

$$\begin{aligned} & \int_S \varphi_i(r) L \left[\sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(r) \eta_k(t) \right] dr \\ & + \int_S \varphi_i(r) m(r) \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(r) \ddot{\eta}_k(t) dr \\ & = -g_s \int_S \varphi_i(r) m(r) \varphi_s(r) \dot{\eta}_s(t) dr \end{aligned} \quad (9)$$

さらに式 (4)、式 (5) に示すモードの直交性を利用することで上式は簡略化され、以下ようになる

$$\ddot{\eta}_i(t) + g_s \dot{\eta}_s(t) \delta_{is} + \omega_i^2 \eta_i(t) = 0, \quad i=1,2,3,\dots \quad (10)$$

図 1 に分布定数系センサおよび分布定数系アクチュエータで構成されるモード制御系の概念図を示す。分布定数系構造物に発生する速度分布の中から、分布定数系センサによりモード速度係数を抽出し、つぎにこの信号をベースに制御信号が生成され、分布定数系アクチュエータを駆動する。この分布定数系アクチュエータは分布制御力 $f(r, t)$

を生成し、モードフィルタリングと逆の原理により、対象とするモードのみに制御効果を与える。また式 (10) を図式化すると図 2 となる。ここでは、モード領域におけるセンシングとアクチュエーションの相関関係が示されており、いま対象とする s 次の速度モード係数のみを抽出し、必要なモード制御ゲインを乗じた後、当該モードのみに制御力が印加されるので、他のモードには一切影響を及ぼすことはない。すなわち、観測スピロバ、制御スピロバを惹起することはない。

Fig. 1 Modal control system of a distributed-parameter structure with distributed-parameter sensor and actuator.

Fig. 2 Signal flow diagram of modal control using distributed parameter sensor and actuator.

3. センサ・アクチュエータ融合フィルムの構築

3.1 電極パターニングフィルム作製手法

本論文では、対象とする振動モードの固有関数の 2 階微分を形状関数とした電極パターニング PVDF フィルムを分布定数系センサおよびアクチュエータフィルムとして用いる。また、パターニング電極の形成手法としてフォトリソ法を採用した。アルミ電極層が両全面に形成された総厚 $110\mu\text{m}$ の PVDF フィルム上に、 380nm 以下の UV 領域の外光をカットした環境下で $2\mu\text{m}$ のポジ型フォトリソ層をスピコート法により形成した。制御対象とする振動モードに応じて、固

有関数の 2 階微分を形状関数としたフォトリソを用いて、フォトリソ層に主波長 365nm の UV 照射 ($0.5\text{J}/\text{cm}^2$) を行った。両面に同処理を施した後、アルカリ現像液を用いて露光部のフォトリソ層とともにアルミ電極層の除去を行った。さらにエタノールを用いて遮光部に残存する最上層のフォトリソ層のみを除去し、所望の電極形状を有する分布定数系センサおよびアクチュエータフィルムを得た。

3.2 センサ・アクチュエータ積層化手法

3-1 で作製した分布定数系センサフィルムとアクチュエータフィルムを積層し、特定の振動モードを抑制可能な積層型フィルムの作製手法を提案する。図 3 に作製工程の概略を示す。ポリエステルフィルムの両面にアクリル系の粘着層が塗布された粘着フィルムをアクチュエータフィルム上にラミネータを用いて転写する ($300\text{mm}/\text{min}$, 一往復)。続いて、もう一方の粘着面上に 80nm のアルミ層を蒸着したポリエステルフィルムを同様の手法で転写する。さらに、アルミ蒸着フィルム上に粘着フィルムを介してセンサフィルムを転写する。最後に室温で 30 分放置することで、5 層構造のセンサ機能とアクチュエータ機能を有する積層型フィルムを作製する。このとき、アルミ蒸着フィルムを接地することでセンサフィルムとアクチュエータフィルムの機能を電氣的に分離する。

Fig. 3 Schematic diagram of fabrication process for modal control film using electrode patterning and laminating technique.

3.3 フィルム特性 図4には積層フィルムの外観写真, 図5には積層後のフィルム断面の概略を示す. また対象フィルムの物性を表1に示す. PVDF フィルムの厚さが $110\mu\text{m}$, 粘着フィルムの厚みは $75\mu\text{m}$, アルミ蒸着フィルムの厚みは $50\mu\text{m}$ であり, 総厚 $420\mu\text{m}$ のフィルムを作製した. 本論文では制御対象とする振動モードを 1 次モードとし, フィルムの外形を $L_x=4.7\text{cm}$, $L_y=1.5\text{cm}$, 固定-自由の一次元平板状構造物とする. センサフィルムおよびアクチュエータフィルムに用いた PVDF フィルムの諸特性は同一とし, 圧電応力定数 e_{31} は 81mC/m^2 , 密度 ρ は 1780kg/m^3 , ヤング率 E は 2.5GPa である. また中間層とするポリエステルフィルムの密度 ρ は 1400kg/m^3 , ヤング率 E は 1.9GPa である.

Fig. 4 Modal control film using distributed parameter sensor film and actuator film appearance.

Fig. 5 Cross-section diagram of modal control film.

Table 1 Design parameters of modal control film.

Layer	Material	L_x [cm]	L_y [cm]	h [μm]	Density ρ [kg/m^3]	E [GPa]
1st modal sensor layer	PVDF	4.7	1.5	110	1780	2.5
1st modal actuator layer	PVDF	4.7	1.5	110	1780	2.5
Interlayer	Polyester	4.7	1.5	200	1400	1.9
Total	-	4.7	1.5	420	1599	2.2

4. モード制御

4.1 実験構成

3-1 および 3-2 で提案した電極パターンニングおよび積層化手法により作製した, モードフィルタリング機能とモードアクチュエーティング機能を内蔵した極薄膜積層フィルムからなるモード制御系を構築し, その制御効果を明らかにする. 本論文では, 積層フィルムのモード制御機能を実証することに主眼を置いているため, 制御効果が安定的に得られるフィードフォワード制御方式を適用した. また, 対象とするフィルムが軽量かつ薄膜であることを考慮し, 加振によるロードイフェクトを避けるため, 非接触加振である音響加振法を採用した. また, 対象フィルムの駆動点インピーダンスは, 観測点 $r=(1.30, 0.75)$ における速度をレーザー変位計により非接触で測定し, 対象周波数領域を 550Hz までとする.

図6に適応フィードフォワード制御系構成図を示す. 積層フィルム中のセンサ層からチャージアンプを介して得られる出力を誤差信号として, Filtered-X LMS アルゴリズムを基調とする適応フィードフォワード制御コントローラに入力する. またこの際に使用したサンプリング周波数は 2362Hz , コントローラとキャンセレーションパスのタップ数は 256 とした. ここで誤差信号を最小化する最適制御則を講じ, アクチュエータ層にパワーアンプを介して制御信号を出力する. センサ層およびアクチュエータ層は対象とする振動モードのみ検出および励起するため, 結果として無数個励起された振動モードの中から対象とする振動モードのみを抑制する構図になる.

Fig. 6 Experimental set up of 1st modal control using feed forward control.

4・2 制御効果の検証 積層型フィルム中の一次モードセンサ層からの出力を誤差信号として、適応フィードフォワード制御を行った。図7および図8はレーザー変位計で得た対象フィルムの振動速度周波数応答を示しており、図7は非制御状態、図8は制御状態を示す。図7から、対象フィルムには550Hz以下において3つの振動モードが存在していることがわかる。非制御状態との比較から明らかなように、1次モードにおいて15dBの抑制効果を得ている。また対象とする振動モードのみが明確に抑制されていることに着目されたい。本論文では同等の特性を有するPVDFフィルムをセンサ層及びアクチュエータ層として使用したが、各層に使用する材料物性及び積層構成の最適化は、制御効果向上手段の一つと考えられる。具体例としては、PVDFに比して圧電効果の大きいフッ化ビニリデン/トリフルオロエチレン共重合体(P(VDF/TrFE))やPZTを高分子中に分散した有機無機ハイブリッド材料のアクチュエータ層への適用による制御力向上、UV硬化型や熱硬化型接着剤等の高硬度接着層形成によるダンピングの影響低減、アクチュエータ層及びセンサ層の積層数最適化による出力調整などが挙げられる。

図9および図10はセンサ層から得られた出力を示し

ており、図9は非制御状態、図10は制御状態を示す。非制御状態では対象とする1次モードは対象外の振動モードに比して25dB以上の高い出力を得ており、単独モードセンサとして十分に機能し得る性能であることがわかる。また制御状態では1次モードの出力のみが20dB以上抑制されていることがわかる。図9及び図10において、対象外の振動モードを検出した原因としては、(1)電極形成時の露光工程におけるフォトマスクの位置ずれに起因した電極形状の誤差、(2)センサフィルムとアクチュエータフィルムの貼り合せ位置精度、(3)貼り合せ時の微小な気泡混入及び配線に起因した面内のフィルム厚み分布が考えられる。(1)及び(2)に関しては、液晶ディスプレイや半導体製造で用いられているようなアライメントマークと光学顕微鏡観察を用いた露光及び貼り合せ技術を適用することで、さらなる高精度化が期待である。また(3)に関しては、真空ラミネータの利用による気泡除去や露光工程での信号取り出し用微細配線の同時形成により、フィルム特性の更なる均質化が期待できる。このように、先述の材料面における改良とプロセス面での改良により、モード制御フィルムとしてさらなる高精度化が期待できる。

以上の結果から、本論文で提案した分布定数系セン

Fig. 7 Frequency characteristics of a modal control film (without control).

Fig. 8 Frequency characteristics of a modal control film (with control).

Fig. 9 Amplitude characteristics of the modal sensor layer output signal (without control).

Fig. 10 Amplitude characteristics of the modal sensor layer output signal (with control).

サフィルムとアクチュエータフィルムを積層した構造体により、フィルム自体がモード制御機能を有する極薄のスマートフィルムとして機能することを実験により確認できたといえる。本論文では制御対象とする振動モードを1個としたが、異なる振動モードを対象としたセンサ・アクチュエータ層を更に積層することで、制御対象とする振動モードを増加することも十分に可能である。これは薄膜フィルム一枚のみで、狙いとする周波数帯域内に存在する複数の振動モードを全て制御できることを意味しており、スピルオーバー問題を克服する新たなスマートフィルムとして期待できる。

5. 結言

フィルムの表面改質技術である電極パターニング技術と積層化技術を融合した分布定数系センサおよびアクチュエータフィルムを基調とするモード制御系を構築し、実験によりその効果を実証した。本論文はまず、分布定数系センサおよびアクチュエータで構成されるモード制御系の統括より始めた。本構成においては、制御スピルオーバーおよび観測スピルオーバーが発生しな

いことを明示した。続いて電極パターニング手法とラミネート法を融合し、分布定数系センサとアクチュエータフィルムが一体化したスマートフィルムの作製手法について提案を行った。さらに一次元平板状構造物を対象として、本スマートフィルムを用いたモード制御系を構築し、実験による制御効果の検証を行った。その結果、制御対象とする振動モードにおいて15dBの抑制効果を得た。また、対象とする振動モード以外には殆ど影響することなく当該モードのみの抑制を達成した。このことにより、モードフィルタリング機能やモードアクチュエーティング機能などの単独機能に続き、僅か数百 μm 厚のフィルム自体がモード制御機能を担う高精度のスマートフィルム創生に成功した。

文 献

- (1) Rosen Brock, H. H., Distinctive problems of process control, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 58, No. 9 (1962), pp. 43-50
- (2) Gould, L. and Murray-Lasso, M., On the modal control of distributed systems with distributed feedback, *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 11, No. 4(1966), pp. 729-737.
- (3) Mayne, D. Q. and Murdoch, P., *International Journal of Control*, Vol. 11, No. 2(1970), pp. 223-227.
- (4) Meirovitch, L. and Baruh, H., Control of Self-Adjoint Distributed parameter System, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 5, No. 1(1982), 60-66.
- (5) Tanaka, N., Kikushima, Y., Kuroda, M., Modal Control of Planar Structure Using Distributed parameter Sensors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 63, No. 606 (1997), pp. 409-416.
- (6) Tanaka, N. and Kobayashi, I., Smart Modal Control of a Simply Supported Flexible Panel Using Smart Actuators, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 708 (2005), pp. 2512-2519.
- (7) Tanaka, N., Kikushima, Y., Kuroda, M., Spatial modal filtering using point sensors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 63, No. 609 (1997), pp. 1559-1567.
- (8) Lee, C. K. and Moon, F. C., Modal Sensors Actuators, *Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics*, 57 (1990), pp. 434-441.
- (9) Collins, S. A., Miller, D. W., von Flotow, A. H., Distributed Sensors as Spatial Filters in Active Structural Control, *Journal of Sound and vibration*, Vol. 173, No. 4(1994), pp. 471-501.
- (10) Tanaka, N., Kikushima, Y., Kuroda, M., Senba, H., Distributed Parameter Modal Sensors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 62, No. 596 (1996), pp. 1418-1425.
- (11) Tanaka, N., Kikushima, Y., Kuroda, M., Design Procedure of one dimensional Distributed Parameter smart sensors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 61, No. 590 (1995), pp. 3923-3930.
- (12) Kikushima, Y. and Tanaka, N., Active Vibration Control of a Truss Structure Using Modal Sensors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No. 686 (2003), pp. 2999-3006.
- (13) Senba, H., Tanaka, N., Kikushima, Y., Kuroda, M., Vibration-Mode Filtering for Flexible Beams Using Optical Fibers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 62, No. 602 (1996), pp. 3929-3937.
- (14) Tanaka, N., Snyder, S. D., Hansen, C. H., Distributed Parameter Modal Filtering Using Smart Sensors, *ASME, Journal of the Vibration and Sound*, Vol. 118, (1996), pp. 630-640.
- (15) Tanaka, N., Kobayashi, I., Smart modal control of a simply supported flexible panel using smart actuators, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 708 (2005), pp. 2461-2468.
- (16) Yoneyama, S. and Tanaka, N., Smart Film Sensors Using Electrode Patterning Technique Of Film Surface, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 758 (2009), pp. 2489-2495.
- (17) Yoneyama, S. and Tanaka, N., Multi-modal Smart Film Sensors Using Electrode Patterning and Laminating Technique, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 758 (2009), pp. 2672-2678.
- (18) Yoneyama, S. and Tanaka, N., Smart Film Actuators Using Electrode Patterning and Laminating Technique, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 758 (2009), pp. 2679-2685.