スマート・クラスターセンサーに関する研究*

田 中 信 雄^{*1}, 福 田 良 司^{*2}

On the Smart Cluster Sensor

Nobuo TANAKA^{*3} and Ryoji FUKUDA^{*3}Tokyo Metropolitan Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering,
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

This paper concerns the smart cluster sensor for distributed parameter structures using a distributed parameter PVDF film. With an aim to extract the particular cluster the structure has, to which all the vibration modes belonging to possess the same characteristics in common, the smart cluster sensor that has a potential to deal with an infinite number of structural modes is presented. First, this paper begins by introducing the necessary condition for cluster filtering to be implemented. Then, by utilizing the PVDF film, the shaping function for the smart cluster sensor is shown, enabling the extraction of the targeted cluster of a structure. The output of the smart cluster sensor is found to be written as using the Fresnel integrals. The fundamental properties of the smart cluster sensor such as the dimension and direction of the sensor are discussed. Finally, the experiment using a simply supported rectangular panel is conducted, demonstrating the validity of the proposed smart cluster sensor.

Key Words: Cluster Filtering, Smart Cluster Sensors, Distributed-Parameter Structure, Middle Authority Control, Fresnel Integral

1. 緒言

分布定数系構造物の振動制御においては、構造物が固有に持つ無数の振動モードのため、制御要素として導入される集中センサー／アクチュエータの使用により、観測／制御スปีルオーバー⁽¹⁾が惹起され、制御系の安定性が著しく損われる。その対策としてこれまでも種々の手法^{(2)~(4)}が提案されているが、それらを総括すると、基本的にはフィルタリングを基調として、限られた周波数帯域で少数の振動モードの抑制を指向する振動制御法であると言える。これに対して、分布定数系構造物の有する全てのモードにダンピングを付与し得る唯一の手法が、コロケーションを基調とするDVFB⁽⁵⁾(Direct Velocity Feedback)法であり、いかなる対象構造物であっても無条件にフィードバック制御系を安定化できるという特徴を有している。しかしながら、本手法がLAC⁽⁶⁾(Low Authority Control)として認知されるように、精緻な制御はできず、その効果も十分ではない。

著者らはこれまでに、LACとHAC(High Authority Control)の中間、MAC(Middle Authority Control)

に位置づけされるクラスター制御法^{(7)~(11)}を提案し、その正当性を立証すると共に、DVFBが本手法の特別なケースであることを明らかにした。クラスター制御法は、分布定数系構造物に存在する無限個の振動モードを、共通した属性を有する有限個のクラスターに弁別し、各々のクラスターに帰属する全ての振動モード群を、簡素な制御手法により効果的に抑制することができる。しかしながら、これまで報告してきたクラスター制御法は、その基本となるクラスターフィルタリングを適用するに当たり、集中センサーの使用をその基礎としてきたため、センサー設置個所が周波数上限を制約してしまうという難点があった。

そこで、本論文は「分布定数系構造物には分布定数系センサーを」と言うセオリーに戻り、分布定数系センサーを基調とするスマート・クラスターフィルタリング法について明らかにする。ここで提案するクラスターフィルタリング法は、分布定数系構造物に無数に存在する全ての振動モードに対処できるフィルタリング法である。

本論文は、分布定数系薄肉矩形平板を対象とするスマートクラスターセンサーについて明らかにし、その具体的な展開に当たっては、これまでの関連論文で取

* 原稿受付 2000年6月22日。

*1 正員, 東京都立科学技術大学工学部(〒191-0065 日野市旭ヶ丘6-6)。

*2 学生員, 東京都立大学大学院。

E-mail: ntanaka@cc.tmit.ac.jp

り上げた単純支持矩形平板を Test vehicle として議論を展開する。まず、本論文は、クラスターフィルタリングを適用し得る条件を示した後、集中センサーをベースとするクラスターフィルタリングの問題点を明らかにする。次に、分布定数系センサーである PVDF フィルムを基調とするスマート・クラスターセンサーを提案し、当該センサーの形状関数を提示する。さらに、周辺単純支持平板を具体例としてセンサー出力の展開を図り、その結果センサー出力は既知関数であるフレネル積分により容易に記述できることを示す。また、形状関数のディメンジョンならびに PVDF フィルムの貼付方向とクラスタリング結果との相関について考察を進めた後に、実験によりスマートクラスターセンサーの有意性を検証する。

2. スマートクラスターセンサー

2.1 クラスタフィルタリングの導入 非減衰薄肉矩形平板の基礎式として、領域 $D (L_x \times L_y)$ (図1参照) においてつぎの偏微分方程式を考える。

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

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

Fig. 1 Coordinate system of a rectangular panel

$$w(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k(\mathbf{r}) w_k \quad (2)$$

$$f(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} m(\mathbf{r}) \phi_k(\mathbf{r}) f_k \quad (3)$$

ただし

$$w(\mathbf{r}, t) = w(\mathbf{r}) e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$f(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r}) e^{j\omega t} \quad (5)$$

さらに自己随伴微分演算子 $\mathbf{L}$ の特性としてモード関数の直交性が成立し、これは次のように正規化することができる。

$$\int_D \phi_r(\mathbf{r}) \mathbf{L}[\phi_s(\mathbf{r})] d\mathbf{r} = \omega_r^2 \delta_{rs} \quad (6)$$

$$\int_D \phi_r(\mathbf{r}) m(\mathbf{r}) \phi_s(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \delta_{rs} \quad (7)$$

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。

さて、クラスターフィルタリング法の導入に当たり、モード関数 $\phi_k(\mathbf{r})$ ($k=1, 2, 3, \dots$) は次式を満たすような、対称または非対称関数であるとする。すなわち、

$$|\phi_k(\mathbf{r}_1)| = |\phi_k(\mathbf{r}_2)| = |\phi_k(\mathbf{r}_3)| = |\phi_k(\mathbf{r}_4)| \quad (8)$$

ただし、

$$\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1) \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_2 = (L_x - x_1, y_1) \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_3 = (L_x - x_1, L_y - y_1) \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_4 = (x_1, L_y - y_1) \quad (12)$$

ただし

$$x_1 < L_x, y_1 < L_y \quad (13)$$

これまでのクラスターフィルタリングに関する報告 (7)~(11) においては、その実現を集中センサーに依拠していたため、ノードラインがセンサー設置個所ないしはその近傍を通過する場合、センサー出力がゼロないしは著しく低下してしまうという難点があった。この傾向は高次モードになるほど顕著となり、クラスターフィルタリングが分布定数系構造物に存する全てのモードを対象とする狙いに反する結果となる。そこ

で次節に記す分布定数系センサーをベースとするクラスターセンサーを提案することにより、全てのモードを瑕疵なくクラスタリングできることを示す。

2.2 スマート・クラスターセンサー 図2に示すように、形状関数 $\psi(x)$ でシェーピングされた2次元PVDFフィルムが、矩形平板左下に貼付されているとする。すると、この場合のセンサー出力 q は次式のように表される。

$$q = \int_0^{x_0} dx \int_0^{y_0} \psi(x) \left\{ \Gamma_0 \left(e_{31} \frac{\partial^2 w(\mathbf{r})}{\partial x^2} + e_{32} \frac{\partial^2 w(\mathbf{r})}{\partial y^2} \right) \right\} dy \quad (14)$$

Fig. 2 Shaping functions of a smart cluster sensor

ただし e_{31} および e_{32} は圧電応力定数、 Γ_0 はセンサー定数を表す。

スマートセンサーとは、信号処理機能を内蔵するセンサーを指し、分布定数系センサーを導入することでこれを実現することができることは既に報告⁽¹²⁾した。本論文は分布定数系センサーであるPVDFフィルムを用いたクラスターセンサーを開発することから、これをスマート・クラスターセンサーと呼ぶことにする。

いま対象としている矩形平板のモード関数は (m,n) モードのとして表記され、平板上に mn 個発現するノードルエリアは、 x 軸および y 軸に平行して走るノードルラインにより分割され、その形状も矩形となる。したがって、形状関数の具備すべき点は、いかなるノードルラインが形状関数上を過ろうとも、式(14)に記述されるセンサー出力がゼロとならないように形状を決定する必要がある。例えば、図2(a),(b)に示すように、形状関数が長方形ないしは直角三角形の場合、これらの分布センサー内を、破線に示されるようなノードルラインが過る時、ノードルエリア隣接間における逆位相特性のため、センサー出力はゼロとなる。これに対して、図2(c)に示すような2次関数でシェーピングされた形状関数の場合、ノードルラインがどのように通過しようとも、センサー出力はゼロとはならない。そこで、形状関数を2次関数以上の高次関数で置換すれば、センサーとしての機能を保有できることが分かる。したがって、当該センサーの要求に適う形状関数は無数に存在するが、その中で最も単純な形状関数が2次関数であると考え、本論文では次式を形状関数として使用することにする。

$$\psi(x) = \frac{y_0}{x_0^2} (x - x_0)^2 \quad (15)$$

2.3 スマート・クラスターセンサー出力

2.3.1 Sensor 1の出力 q_1 式(15)で記述される形状関数でシェーピングされたセンサー（これをSensor 1と呼ぶ）が、スマート・クラスターセンサーとしての機能を有するの否かを検証するためには、式(14)の展開を図る必要がある。そこで、ここでは振動解析解の得られている周辺単純支持矩形平板を具体例に、Sensor 1の出力 q_1 の解析解を導出する。

まず、単純支持平板の振動モード関数 $\phi_k(\mathbf{r})$ ($k=1,2,3 \dots$) は次式のように表される。

$$\varphi_k(r) = \sin \alpha_k x \sin \beta_k y \quad (16)$$

ただし

$$\alpha_k = \frac{m_k \pi}{L_x}, \quad \beta_k = \frac{n_k \pi}{L_y} \quad (17)$$

ここで、 m_k, n_k はモード指数を表す。

式(2)、(16)を式(14)に代入し整理すると次式を得る。

$$q_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2\beta_k} \int_0^{x_0} \left[\sin \left\{ \alpha_k x + \beta_k \psi(x) \right\} - \sin \left\{ \alpha_k x - \beta_k \psi(x) \right\} - \frac{\beta_k}{a_k} \sin \alpha_k x \right] dx \quad (18)$$

ただし

$$a_k = w_k \Gamma_0 (e_{31} \alpha_k^2 + e_{32} \beta_k^2) \quad (19)$$

式(18)に式(16)を代入し展開すると、式(18)の被積分項の内、第1項 q_{k11} は

$$q_{k11} = \int_0^{x_0} \sin \left\{ \frac{\beta_k y_0}{x_0^2} x^2 + \left(\alpha_k - \frac{\beta_k y_0}{x_0^2} \right) x + \beta_k y_0 \right\} dx \quad (20)$$

第2項 q_{k12} は

$$q_{k12} = - \int_0^{x_0} \sin \left\{ \frac{\beta_k y_0}{x_0^2} x^2 - \left(\alpha_k + \frac{\beta_k y_0}{x_0^2} \right) x + \beta_k y_0 \right\} dx \quad (21)$$

第3項 q_{k13} は

$$q_{k13} = \frac{\beta_k}{a_k \alpha_k} (\cos \beta_k x_0 - 1) \quad (22)$$

さらに式(20)はフルネルの公式⁽¹³⁾により、次式のように記述できる。

$$q_{k11} = \sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k1} - B_{k1}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k x_0 + B_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{B_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} + \sin \frac{A_k C_{k1} - B_{k1}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k x_0 + B_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{B_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (23)$$

ただし

$$A_k = \frac{\beta_k y_0}{x_0^2} \quad (24)$$

$$B_{k1} = \frac{1}{2} \left(\alpha_k - \frac{2\beta_k y_0}{x_0} \right) \quad (25)$$

$$C_{k1} = \beta_k y_0 \quad (26)$$

また、式(23)の右辺にある $S(x)$ および $C(x)$ は、各々フレネル正弦積分およびフレネル余弦積分を表し、次のように定義される。

$$S(x) = \int_0^x \sin \left(\frac{\pi}{2} u^2 \right) du \quad (27)$$

$$C(x) = \int_0^x \cos \left(\frac{\pi}{2} u^2 \right) du \quad (28)$$

同様に、式(21)もフレネル積分を用い、次式のように記述される。

$$q_{k12} = - \sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k2} - \tilde{B}_{k1}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k x_0 + \tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{\tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} + \sin \frac{A_k C_{k2} - \tilde{B}_{k1}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k x_0 + \tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{\tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (29)$$

ただし

$$\tilde{B}_{k1} = -\frac{1}{2} \left(\alpha_k + \frac{2\beta_k y_0}{x_0} \right) \quad (30)$$

式(20)、(23)、(29)を式(18)に代入することにより、Sensor 1 の出力 q_1 は次式となる。

$$q_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2\beta_k} (q_{k11} + q_{k12} + q_{k13}) \quad (31)$$

平板右下、右上、左上に設置したセンサー (Sensor 2, Sensor 3, Sensor 4 と呼ぶ) の出力 q_2, q_3, q_4 も、形状関数を以下のように置くことで、これまでと全く同様の手順で導出できるので、具体的な展開は割愛し、結果のみを記すことにする。

$$\psi_2(x) = \psi(L_x - x) \quad (32)$$

$$\psi_3(x) = L_y - \psi(L_x - x) \quad (33)$$

$$\psi_4(x) = L_y - \psi(x) \quad (34)$$

2.3.2 Sensor 2 の出力 q_2 形状関数 $\psi_2(x)$ (式 (32)) でシェーピングされた Sensor 2 の出力 q_2 は次式で表される。

$$q_2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2\beta_k} (q_{k21} + q_{k22} + q_{k23}) \quad (35)$$

ただし

$$\begin{aligned} q_{k21} = & \sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k2} - B_{k2}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k L_x + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right. \\ & \left. + \sin \frac{A_k C_{k2} - B_{k2}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k L_x + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{k22} = & -\sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k2} - B_{k2}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k L_x + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right. \\ & \left. + \sin \frac{A_k C_{k2} - B_{k2}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k L_x + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k2}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (37) \end{aligned}$$

$$q_{k23} = \frac{\beta_k}{a_k \alpha_k} \left\{ \cos \alpha_k L_x - \cos \alpha_k (L_x - x_0) \right\} \quad (38)$$

ただし

$$B_{k2} = \frac{1}{2} \left(\alpha_k - \frac{2(L_x - x_0)\beta_k y_0}{x_0^2} \right) \quad (39)$$

$$\bar{B}_{k2} = -\frac{1}{2} \left(\alpha_k + \frac{2(L_x - x_0)\beta_k y_0}{x_0^2} \right) \quad (40)$$

$$C_{k2} = \frac{\beta_k y_0 (L_x - x_0)^2}{x_0^2} \quad (41)$$

2.3.3 Sensor 3 の出力 q_3 形状関数 $\psi_3(x)$ (式 (33)) でシェーピングされた場合のセンサー出力 q_3 は次式となる。

$$q_3 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2\beta_k} (q_{k31} + q_{k32} + q_{k33}) \quad (42)$$

ただし

$$\begin{aligned} q_{k31} = & \sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k3} - B_{k3}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k L_x + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right. \\ & \left. + \sin \frac{A_k C_{k3} - B_{k3}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k L_x + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (43) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{k32} = & -\sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k3} - B_{k3}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k L_x + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right. \\ & \left. + \sin \frac{A_k C_{k3} - B_{k3}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k L_x + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k3}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (44) \end{aligned}$$

$$q_{k33} = -\frac{\beta_k \cos \beta_k L_y}{a_k \alpha_k} \left\{ \cos \alpha_k L_x - \cos \alpha_k (L_x - x_0) \right\} \quad (45)$$

ただし

$$B_{k3} = -\frac{1}{2} \left(\alpha_k + \frac{2(L_x - x_0)\beta_k y_0}{x_0^2} \right) \quad (46)$$

$$\bar{B}_{k3} = \frac{1}{2} \left(\alpha_k - \frac{2(L_x - x_0)\beta_k y_0}{x_0^2} \right) \quad (47)$$

$$C_{k3} = \frac{\beta_k y_0 (L_x - x_0)^2}{x_0^2} - \beta_k L_y \quad (48)$$

2.3.4 Sensor 4 の出力 q_4 形状関数 $\psi_4(x)$ (式 (34)) でシェーピングされた場合のセンサー出力 q_4 は次式となる。

$$q_4 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2\beta_k} (q_{k41} + q_{k42} + q_{k43}) \quad (49)$$

ただし

$$\begin{aligned} q_{k41} = & \sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k4} - B_{k4}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k L_x + B_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right. \\ & \left. + \sin \frac{A_k C_{k4} - B_{k4}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k L_x + B_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + B_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (50) \end{aligned}$$

$q_{k42} =$

$$-\sqrt{\frac{\pi}{2A_k}} \left[\cos \frac{A_k C_{k4} - \tilde{B}_{k4}^2}{A_k} \left\{ S \left(\frac{A_k L_x + \tilde{B}_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) - S \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + \tilde{B}_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right. \\ \left. + \sin \frac{A_k C_{k4} - \tilde{B}_{k4}^2}{A_k} \left\{ C \left(\frac{A_k L_x + \tilde{B}_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) - C \left(\frac{A_k (L_x - x_0) + \tilde{B}_{k4}}{\sqrt{A_k}} \right) \right\} \right] \quad (51)$$

$$q_{k43} = -\frac{\beta_k \cos \beta_k L_y}{\alpha_k \alpha_k} (\cos \alpha_k x_0 - 1) \quad (52)$$

ただし

$$B_{k4} = -\frac{1}{2} \left(\alpha_k + \frac{2\beta_k y_0}{x_0} \right) \quad (53)$$

$$\tilde{B}_{k4} = \frac{1}{2} \left(\alpha_k - \frac{2\beta_k y_0}{x_0} \right) \quad (54)$$

$$C_{k4} = -\beta_k (L_y - y_0) \quad (55)$$

2.4 クラスターフィルタリング (2.3)節で得られたセンサー出力を用いて、矩形平板に発現する全モード関数を4種類のクラスターに分割することができる。すなわち、クラスターが固有に持つ属性を利用することにより、奇/奇モードクラスターは

$$q_{\text{odd/odd}} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (56)$$

奇/偶モードクラスターは

$$q_{\text{odd/even}} = q_1 + q_2 - q_3 - q_4 \quad (57)$$

偶/奇モードクラスターは

$$q_{\text{even/odd}} = q_1 - q_2 - q_3 + q_4 \quad (58)$$

偶/偶モードクラスターは

$$q_{\text{even/even}} = q_1 - q_2 + q_3 - q_4 \quad (59)$$

として抽出できる。

3. スマートクラスターセンサーの特性

単純支持平板 (60 cm x 120 cm x 4 mm) を対象として、2章で導出したスマート・クラスターセンサーの出力特性を考察する。なおその際に、PVDFフィルムの諸元 ($e_{31} = 75 \text{ mC/m}^2$ 、 $e_{32} = 6 \text{ mC/m}^2$) を使用し、モード係数 w_k は、全モードが均等に励起されているものと仮定し、 $w_k = 1$ ($k=1,2,3,\dots$) とする。

まず形状関数の貼付方向とセンサー感度の関係から吟味しよう。図3は、式(15)に示す形状関数 ($x_0 = 5 \text{ cm}$ 、 $y_0 = 10 \text{ cm}$) でシェーピングされた Sensor 1 のセンサー出力比を、振動モード(1,1)~(1,20)に対して示している。ここでセンサー出力比とは、Type 1 (e_{31} を y 軸方向に貼付した場合) における(1,1)モードに対するセンサー出力値で、全てのセンサー出力値を正規化したものである。

圧電応力定数 e_{31} と e_{32} はこの場合 12.5 倍の差があるため、その貼付方向によってセンサー出力が大きく影響される。図3に示すように、Type 1 と Type 2 (e_{31} を x 軸方向に貼付した場合) の相違は明らかで、高次モードになるほど Type 1 のセンサー出力が高まる。これは、y 軸方向のモード指数 n_k が増大することによ

Fig. 3 Setting direction and sensitivity of a smart cluster sensor

り、y 軸方向の歪量が増大し、それをセンサーがセンシングするからである。この傾向は、式(14)により説明することができる。すなわち、k 番目のモードに対して、Type 1 は $(e_{31}\beta_k^2 + e_{32}\alpha_k^2)$ 、Type 2 では $(e_{31}\alpha_k^2 + e_{32}\beta_k^2)$ の係数がセンサー出力に反映される。いま、モード指数 m_k, n_k のうち m_k は 1 として固定し、 n_k のみを増加させると、 α_k^2 は変化せず β_k^2 のみが増加する。Type 1 ではこの β_k^2 に高感度の e_{31} が乗ぜられるため、相乗的に高出力となる。

また、y 方向のセンサーサイズが $y_0 = 10 \text{ cm}$ であるので、(1,1)モードから(1,12)モードにおいては x 軸方向に走るノードラインが当該センサー内を通ることはないが、それ以上の高次モードではセンサー内を走る点に留意されたい。この場合、ノードエリア隣接間の位相特性のため、センサー出力は減少することが考えられるが、図 3 で示されているセンサー出力においてその影響は殆ど認められない。

さらに図 3 には、(1,1)モードから(1,3)モードまでのセンサー出力比を拡大表示した図を載せている。(1,1)モードに着目すると、この場合に限っては Type 2 のセンサー出力の方が Type 1 より大きい。その理由は、x 方向の歪量が y 軸方向の場合より大きいからである。また(1,2)モードにおいては 2 つのノードエリア (60 cm x 60 cm) のアスペクト比が同一となるため、x, y 双方向の歪量も同一となり、Type 1 および Type 2 のセンサー出力は等しくなっている。

(1,1)モードに対して、 x_0 を 5cm に固定し、 y_0 を 1 cm から対象平板の y 方向における長さ 120cm まで増大させた場合のセンサー出力比を表示すると図 4 になる。作図に当り、Type 2 における $x_0 = 5 \text{ cm}$, $y_0 = 1 \text{ cm}$ におけるセンサー出力で全データを正規化している。

Fig. 4 Setting direction and sensitivity of PVDF film

(1,1)モードにおいては、平板内でのノードラインは存在しないので、ノードエリア隣接間で発生する信号相殺を考慮する必要はない。この図より、スマートセンサーの形状が大きいほどセンサー出力は高まり、また歪量の大きい x 方向に PVDF フィルムを貼付した方が、出力感度の面で有利となることが分かる。

つぎに、Type 1 について、4 種類のクラスターに対する各センサー出力比 (Sensor 1 の出力で正規化) を描画すると図 5 となる。ここでは、各クラスターにおける最低次モードを 1 つだけ代表させて示しており、図から明らかなように、これらの出力を加減算することでクラスターフィルタリングできることが理解されよう。

4. 実験

周辺単純支持鋼板 (61.2 cm x 121.2 cm x 4.2 mm) を対象としてスマート・クラスターセンサーの機能を実験により検証する。形状関数の諸元としては $x_0 = 5 \text{ cm}$, $y_0 = 5 \text{ cm}$ を使用し、貼付方向は Type 2 とすることで対象モード・センシングの均等化を指向した。

スマート・クラスターセンサーによる 4 種類のクラスターフィルタリング結果を図 6 に示している。図 6 (a)は駆動点イナータンスを示しており、対象とする 500Hz までの周波数領域において(1,1)から(1,8)モードまで、都合 22 個の振動モードが現れている。これらのモードを 4 種類のクラスター (奇/奇モード、奇/偶モード、偶/奇モード、偶/偶モード) に弁別した結果が図 6 (b)~(e)に示されている。なお、各センサー出力の加減算は DSP を用いて処理した。

図より明らかなように、対象周波数領域において 22 個存在するモードが、4 種類のクラスター群に弁別

Fig. 5 Sensor outputs for four kind of clusters

されており、本論文で提案したスマート・クラスターセンサーの有意性がここに実証されている。また、22個のモードの内、縮退に近いケースが数組存在しており、例えば(1,4)モード(139Hz)および(2,2)モード

(138Hz)はその状態にあるが、スマート・クラスターセンサーを適用することにより、これらのモードが奇/偶モードクラスターおよび偶/偶モードクラスターに整然と弁別されている。

5. 結言

PVDF フィルムを基調とするスマート・クラスターセンサーを提案し、その有意性を立証した。本論文で得られた成果を要約すると次の通り。

1. 分布定数系平板構造物に発現する全ての振動モードを、瑕疵なくクラスタリングできるスマート・クラスターセンサーを提案し、その設計法を明らかにした。
2. センサーをシェーピングする上で必要な形状関数は、ユニークに決定することはできないが、その中で最も簡素な関数が2次関数である。
3. 周辺単純支持平板を対象としてセンサー出力の展開を図ったところ、センサー出力が、既存関数であるフレネル積分により記述できることが判明した。
4. モード指数の変動が大きい方向にセンサーを貼付することにより、高感度のセンサー出力を得ることができる。また、ここで提案されたスマート・クラスターセンサーの表面面積を増加するに伴い、センサー出力も増大する。
5. 周辺単純支持鋼板を対象としてスマート・クラスターセンサーの正当性を実証した。

終わりに、本研究を進めるに当たり、本学卒論生渡辺篤君から多大な協力を得たのでここに感謝する。

文献

1. Balas, M.J., J. Optimization Theory and Applications, 25-3, (1978), 415-436
2. Meirovitch, L. and Baruh, H., J. Optimization Theory and Applications, 39-2, (1983), 269-291
3. Meirovitch, L., and Baruh, H., J. Guidance, 8-6, (1985), 707-716
4. Gustafson, D., and Speyer, J., IEEE Trans. Auto. Contr., Ac-21, (1976), 65-73
5. Balas, M.J., J. Guidance, 2-3, 252-253 (1979)
6. Aubrun J. N., J. Guidance and Control, Vol. 3, 444-451 (1980)
7. 田中信雄・菊島義弘、機論、64-619, C(1998), 780-787
8. 田中信雄・菊島義弘、機論、64-619, C(1998), 788-796
9. 田中信雄・菊島義弘、機論、64-622, C(1998), 1940-1948
10. 田中信雄・菊島義弘、機論、64-627, C(1998), 4231-4239
11. 田中信雄・菊島義弘、機論、65-639, C(1999), 4312-4319
12. 田中信雄・菊島義弘、機論、59-567, C(1993), 3444-3451
13. Spiegel, M.R., Mathematical Handbook, McGraw-Hill, 1992

Fig. 6 Clustering effect of a smart cluster sensor
(a) Driving point inertance, (b) odd/odd modal cluster,
(c) odd/even modal cluster, (d) even/odd modal cluster,
(e) even/even modal cluster