クラスタ・フィードフォワード制御による 分布定数系構造物の振動制御について*

田 中 信 雄^{*1}, 菊 島 義 弘^{*2}

Active Vibration Control of Distributed-Parameter Structure Using Cluster Feedforward Control

Nobuo TANAKA and Yoshihiro KIKUSHIMA

For the purpose of suppressing all the vibration modes of a distributed parameter structure, this paper proposes a novel active vibration control called cluster feedforward control consisting of both the cluster filtering method presented by the authors and a feedforward control method based upon a filtered- x LMS algorithm. First, this paper derives the optimal control law of the cluster feedforward control, a numerical example based upon the control law for eliminating all the structural modes of a planar structure being shown. Experimental results show the capability for suppressing a single cluster, then all cluster of a planar structure, that leads to the suppression of all structural modes. Finally, comparing the conventional multiple SISO feedforward control with the cluster feedforward control, the superiority of the cluster feedforward control is discussed.

Key Words: Vibration Modes, Distributed-Parameter Structures, Cluster Feedforward Control, Cluster Filtering, Cluster Actuation

1. 緒 言

振動制御法を分類すると、基本的にはフィードフォワード制御法およびフィードバック制御法による手法の2種類に大別されよう。フィードフォワード制御法は、系入力へのアクセスを前提として展開され、制御的には外乱作用点・観測点間伝達関数の零点を操作するのに対し、フィードバック制御法は系出力をベースとして制御系を構成し、伝達関数の極を操作して制御性能を追及する。したがって、制御信号の流れを考えれば明らかなように、系応答を待って作動するフィードバック制御法よりは、系に入力が印加する時点で制御方策を講ずるフィードフォワード制御法の方が良好な制御効果を期待できることは容易に想像されよう。

フィードフォワード制御法としては、Filtered- x LMS アルゴリズム^{(1)~(4)}を基盤とする適応制御形フィードフォワード法がよく知られている。当該手法は、これまでのフィードフォワード制御法の欠点であった、系特性変動に伴う急激な制御性能劣化を、系同定

のインプロセス化による適応制御機能⁽⁵⁾の付加により解決している。加えて、当該手法の制御系設計に当たっては、アприオリな数学モデルを必要とせず、現場で採取した状態信号を用いて制御系を構築できるという実利性を有していることから、知的制御法⁽⁶⁾の視点からも最近注目されている手法の一つである。

Filtered- x LMS アルゴリズムを基調とするフィードフォワード制御法は、基本的には1制御アクチュエータ/1センサ(SISO)^{(1)~(3)}で構成されるが、本手法の欠点は、センサ点での状態量(音圧や速度など)を最小とすることはできても、センサ点以外の場における状態量制御は保証できないことである。その対策として、制御の場に複数のセンサを配置し、それに応じてアクチュエータ数も増加し、制御対象場におけるグローバルな状態量の抑制を指向する手法(MIMO)⁽⁴⁾が提案されている。しかしながら、それに伴うアルゴリズムは膨大な演算量を必要とし、これを演算機能が急速に発展している現在のDSP(Digital Signal Processor)で具現化しようとしても過剰な負担がかかり、とりわけ対象場の特性が複雑な場合、対処し難いというのが現状である。

本論文は、分布定数系平板構造物を対象として、クラスタ・フィードフォワード制御法を提案し、本手法

* 原稿受付 1997年7月29日。

^{*1} 正員, 東京都立科学技術大学 (〒191-0065 日野市旭が丘6-6)。

^{*2} 正員, 工業技術院機械技術研究所 (〒305-8564 つくば市並木1-2)。

による全振動モードの抑制法について明らかにするものである。すなわち、著者らにより提案されているクラスタフィルタリング⁽⁷⁾⁽⁸⁾とフィードフォワード制御法を融合することにより、簡素な SISO 制御法の導入が可能となる。無数の振動モードが、同じ属性を有する有限個のクラスタに分類されるという特徴を利用すれば、1 クラスタは一つの制御操作により抑制できるので、各クラスタごとに SISO フィードフォワード制御系を導入することで、すべての振動モードを抑制することができる。

本論文では、クラスタパワーを最小とする最適フィードフォワード制御則を導出することから始める。次いで、分布定数系平板構造物の振動モードを4個のクラスタ(奇/奇モード、奇/偶モード、偶/奇モード、偶/偶モード)にフィルタリングした後に、SISO フィードフォワード制御により、クラスタ因子を抑制する。さらに、各クラスタ制御を統合することにより、対象周波数領域に存在するすべての振動モードの抑制を行う。この際に、通常のフィードフォワード制御法では、制御信号を加算することでこれらは相殺してしまう危険性があるが、この場合は、クラスタ同士は互いに独立しているという特徴があるため、このような相殺は生ぜず、全振動モードの抑制が可能となることを示す。最後に、クラスタ制御に依拠しない通常の SISO フィードフォワード制御系と、本論文で提案するクラスタ・フィードフォワード制御系の効果について比較検討を行う。

2. クラスタ・フィードフォワード制御

2・1 最適制御則の導出 非減衰分布定数系構造物の基礎式として、領域 D において次の偏微分方程式を考える。

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

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、 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 $\varphi_k(\mathbf{r}) (k=1, 2, 3, \dots)$ を基本関数として、以下のように記述することができる。

$$\begin{aligned} w(\mathbf{r}) &= \sum_{k=1}^N \varphi_k(\mathbf{r}) w_k \\ &= \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{r}) \mathbf{w} \quad \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\mathbf{r}) &= \sum_{k=1}^N m(\mathbf{r}) \varphi_k(\mathbf{r}) f_k \\ &= m(\mathbf{r}) \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{r}) \mathbf{f} \quad \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

ただし、

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

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

$$\boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{r}) = (\varphi_1(\mathbf{r}), \varphi_2(\mathbf{r}) \cdots \varphi_N(\mathbf{r})) \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\mathbf{f}^T = (f_1, f_2, \dots, f_N) \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで、 τ はベクトル転置を表す。さらに自己随伴微分演算子 L の特性としてモード関数の直交性が成立し、次のように正規化することができる。

$$\int_D \varphi_r(\mathbf{r}) L[\varphi_s(\mathbf{r})] d\mathbf{r} = \omega_r^2 \delta_{rs} \quad \cdots \cdots (8)$$

$$\int_D \varphi_r(\mathbf{r}) m(\mathbf{r}) \varphi_s(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \delta_{rs} \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで ω_r は r 次のモード周波数、 δ_{rs} はクロネッカデルタを表す。

本論文はこれまでの関連論文⁽⁷⁾⁽⁸⁾との整合性を考えて、非減衰薄肉矩形平板 ($L_x \times L_y \times h$) を対象とする。すると、この場合の自己随伴微分演算子 L は次式となる。

$$\begin{aligned} L &= \nabla^4 = \nabla^2 \nabla^2 \\ &= \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad \cdots \cdots (10) \end{aligned}$$

さて、平板の任意点 $\mathbf{r}_i$ に設置した速度センサ出力 $v(\mathbf{r}_i)$ を考える。すると $v(\mathbf{r}_i)$ は固有関数 $\varphi_k(\mathbf{r})$ および速度モード係数 v_k を用いて次式のように記述できる。

$$\begin{aligned} v(\mathbf{r}_i) &= \sum_{k=1}^N \varphi_k(\mathbf{r}_i) v_k \\ &= \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{r}_i) \mathbf{v} \quad \cdots \cdots (11) \end{aligned}$$

ただし

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_N)^T \quad \cdots \cdots (12)$$

次にセンサを次式に示すように矩形平板の四隅に設置するものとする。

$$\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1) \quad \cdots \cdots (13)$$

$$\mathbf{r}_2 = (L_x - x_1, y_1) \quad \cdots \cdots (14)$$

$$\mathbf{r}_3 = (L_x - x_1, L_y - y_1) \quad \cdots \cdots (15)$$

$$\mathbf{r}_4 = (x_1, L_y - y_1) \quad \cdots \cdots (16)$$

ただし

$$x_1 \ll L_x, y_1 \ll L_y \quad \cdots \cdots (17)$$

すると、これら四つのセンサの極性を考慮し、その出力を加減算することにより、対象周波数領域に存在するすべての固有モードを4種類のクラスタ⁽⁷⁾⁽⁸⁾(奇/奇モードクラスタ、奇/偶モードクラスタ、偶/奇モードクラスタ、偶/偶モードクラスタ)に弁別することができる。

本論文では、上記のクラスタの中で、振動放射音の最大支配因子⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾である奇/奇モードクラスタを代表して取上げ、この例証を通じて論旨を展開していく。まず、奇/奇モードクラスタをフィルタリングにおい

ては、次式のように全センサ出力を単純加算すればよ

い⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$$\begin{aligned} e_{o/o} &= v(r_1) + v(r_2) + v(r_3) + v(r_4) \\ &= \{\varphi_1(r_1) + \varphi_1(r_2) + \varphi_1(r_3) + \varphi_1(r_4)\}v_1 \\ &\quad + \{\varphi_2(r_1) + \varphi_2(r_2) + \varphi_2(r_3) + \varphi_2(r_4)\}v_2 \\ &\quad \vdots \\ &= 4\varphi_1^{o/o}(r_1)v_1^{o/o} + 4\varphi_2^{o/o}(r_1)v_2^{o/o} \\ &\quad + 4\varphi_3^{o/o}(r_1)v_3^{o/o} \dots \\ &= \varphi_{o/o}^T(r_1)v_{o/o} \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

ただし、

$$\varphi_{o/o}^T(r_1) = (4\varphi_1^{o/o}(r_1), 4\varphi_2^{o/o}(r_1), 4\varphi_3^{o/o}(r_1), \dots) \dots \dots (19)$$

$$v_{o/o}^T = (v_1^{o/o}, v_2^{o/o}, v_3^{o/o} \dots) \dots \dots (20)$$

次に、クラスタアクチュエーション⁽⁷⁾⁽⁸⁾を考えよう。クラスタアクチュエーションはクラスタフィルタリングと双対関係⁽⁷⁾⁽⁸⁾にあるので、この場合も平板四隅に設置した四つのアクチュエータにより、対象とするクラスタのみを独立して励起することができる。すると、この場合の振動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} L[w(r, t)] + m(r)\ddot{w}(r, t) &= F_p\delta(r - r_p) \\ &\quad + \sum_{i=1}^4 F_i\delta(r - \tilde{r}_i) \dots \dots \dots (21) \end{aligned}$$

ただし、 F_p は外乱力、 $F_{1,2,3,4}$ は制御力、 δ はディラクのデルタ関数を表す。次に式(2)を式(21)に代入し、両辺に $\varphi_k(r)$ を乗じ、さらに領域 D で積分すると速度モード係数 v_k は次式のように求まる。

$$v_k = z_k^p F_p + \sum_{i=1}^4 z_k^{c,i} F_i \dots \dots \dots (22)$$

ここで、

$$z_k^p = \frac{j\omega\varphi_k(r_p)}{\omega_k^2 - \omega^2} \dots \dots \dots (23)$$

$$z_k^{c,i} = \frac{j\omega\varphi_k(\tilde{r}_i)}{\omega_k^2 - \omega^2} \quad (i=1, 2, 3, 4) \dots \dots \dots (24)$$

次に制御力を次式のようにおくことで、奇/奇モードクラスタのアクチュエーション⁽⁷⁾⁽⁸⁾が達成できる。

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 \dots \dots \dots (25)$$

すると、奇/奇モードの速度モード係数は

$$v_k^{o/o} = z_k^{o/o,p} F_p + 4z_k^{o/o,c,1} F_1 \dots \dots \dots (26)$$

奇/奇モード以外の速度モード係数は

$$v_k^{Non(o/o)} = z_k^{Non(o/o),p} F_p \dots \dots \dots (27)$$

となる。

式(26)および(27)より明らかなように、制御力は今対象としている奇/奇モードクラスタにのみ作用し、それ以外のクラスタには影響を与えることがない。次に式(26)を用いて、式(20)の速度モード係数ベクトルを記述すると次式となる。

$$v_{o/o} = z_{p,o/o} F_p + z_{c,o/o} F_1 \dots \dots \dots (28)$$

ただし、

$$z_{p,o/o} = (z_{p,1}^{o/o}, z_{p,2}^{o/o}, \dots)^T \dots \dots \dots (29)$$

$$z_{c,o/o} = (z_{c,1}^{o/o}, z_{c,2}^{o/o}, \dots)^T \dots \dots \dots (30)$$

次に、式(18)で表される奇/奇モードクラスタ出力 $e_{o/o}$ の二乗値を最小化する問題を考える。まず $e_{o/o}$ の自乗は次のように展開できる。

$$\begin{aligned} e_{o/o}^2 &= v_{o/o}^H \varphi_{o/o}(r_1) \varphi_{o/o}^T(r_1) v_{o/o} \\ &= v_{o/o}^H \Phi_{o/o}(r_1) v_{o/o} \\ &= z_{c,o/o}^H \Phi_{o/o}(r_1) z_{c,o/o} F_1^2 \\ &\quad + z_{c,o/o}^H \Phi_{o/o}(r_1) z_{p,o/o} F_p F_1 \\ &\quad + z_{p,o/o}^H \Phi_{o/o}(r_1) z_{c,o/o} F_p F_1 \\ &\quad + z_{p,o/o}^H \Phi_{o/o}(r_1) z_{p,o/o} F_p^2 \dots \dots \dots (31) \end{aligned}$$

ここで、 H はエルミートを表す。また、式(31)は制御力 F_1 に関する2次式であり、かつマトリックス $\Phi_{o/o}$ は半正定実対称マトリックスであるので、式(31)を制御力 F_1 に関して微分することにより、奇/奇モードクラスタパワーを最小とする最適フィードフォワード制御則が次のように求まる。

$$F_1 = -\frac{z_{c,o/o}^T \Phi_{o/o}(r_1) z_{p,o/o} F_p}{z_{c,o/o}^T \Phi_{o/o}(r_1) z_{c,o/o}} \dots \dots \dots (32)$$

ここで留意すべき点は、式(32)に示されている制御則は、奇/奇モードクラスタにのみ影響を及ぼし、他のクラスタには一切影響を与えることがないことである。同様に、他のクラスタに関する最適フィードフォワード制御則も求まり、これらを同時に駆動することで、すべてのクラスタパワーを最小とすることができる。

図1には、Filtered- x LMS アルゴリズムをベースとするクラスタ・フィードフォワード制御系の概念図が示されている。クラスタフィルタリングを考慮しない在来手法では、特性の異なるすべての振動モードを一括して制御しなければならない。さらに、振動制御の基本であるモード制御においては、対象とする振動モードと同数のアクチュエータを必要とする⁽¹¹⁾など、数多くの振動モードを制御しようとする制御系の巨大化、複雑化は避けえないことになる。これに対して、クラスタフィルタリングを講ずることにより、全振動モードは同じ属性を有する4種類のクラスタに帰属されるため、各クラスタを、簡素なSISOフィードフォワード制御法により、これらを独立して制御することができる。

2・2 数値解析例 本実験で用いた鋼板製周辺単純支持パネル($L_x=88$ cm, $L_y=180$ cm, $h=9$ mm)の仕様を用いて、理論的に達成されるクラスタ・フィードフォワード制御効果を明らかにしよう。外乱は $r_p=(0.645$ m, 1.451 m)に作用し、クラスタ制御用アクチュエータは、おのおの $r_1=(20$ cm, 21 cm), $r_2=$

Fig. 1 Conceptual diagram of a cluster feedforward control of a distributed parameter system

Table 1 Modal frequency and modal number of a simply supported plate of (88 cm × 180 cm × 9 mm)

Mode number	Mode	Modal frequency Hz	Mode number	Mode	Modal frequency Hz
1	(1,1)	35.292	12	(3,2)	283.588
2	(1,2)	55.716	13	(2,5)	284.136
3	(1,3)	89.756	14	(3,3)	317.628
4	(2,1)	120.744	15	(2,6)	359.024
5	(1,4)	137.412	16	(1,7)	362.077
6	(2,2)	141.168	17	(3,4)	365.284
7	(2,3)	175.208	18	(3,5)	426.556
8	(1,5)	198.684	19	(2,7)	447.529
9	(2,4)	222.864	20	(4,1)	462.551
10	(3,1)	263.164	21	(1,8)	464.197
11	(1,6)	273.573	22	(4,2)	482.975

Fig. 2 Optimal control law of a cluster feedforward control on the odd/odd modal cluster

(68 cm, 21 cm), r_3 =(68 cm, 159 cm), r_4 =(20 cm, 159 cm) に設置されるものとする。また、対象周波数範囲としては 500 Hz までとし、表 1 には当該周波数域内に存在する 22 個のモード周波数の解析解とそのモード番号が昇算の順に示されている。

Fig. 3 Driving point mobility before and after cluster control on the odd/odd modal cluster

図 2 は式 (32) で示される最適フィードフォワード制御則を、また図 3 は、本制御則を講ずることにより達成される奇/奇モードクラスタ抑制効果を示している。非制御状態 [図 3(a)] では 22 個の振動モードが励起されているが、その内の 7 個の奇/奇モードのみが図 3(b) に示すように完全に抑制されている。また、それ以外のクラスタに属する振動モードは一切影響を受けていない。

3. クラスタ・フィードフォワード制御の実験

本章は、実験の立場からクラスタ・フィードフォワード制御の有意性を立証する。そのために、まず2章で対象とした奇/奇モードクラスタ制御効果を明らか

Fig. 4 Polarity of cluster filtering/actuation on a plate

Fig. 5 Disturbance force spectrum and driving point mobility of the simply supported panel

にした後、全クラスタ、すなわち全振動モードの抑制効果を検証する。

実験で使用される鋼板製供試パネルは、厚さ 10 cm の鉄筋コンクリート製エンクロージャの上面でパネル両面をナイフエッジで挟むように固定され、その単純支持境界条件を成立させている。また、パネル加振信号には帯域制限された 10~500 Hz の白色雑音を使用し、これで動電形加振器を駆動するとともに、制御システムの設定は、サンプリング周波数 1000 Hz、Filtered- x LMS アルゴリズムのための FIR タップ長および適応フィルタタップ長を 150 とした。

3.1 奇/奇モードクラスタの抑制 図 4 はクラスタフィルタリング/アクチュエーションのための速度センサ/アクチュエータに課せられる極性を示している。例えば本節で主題の奇/奇モードクラスタは、図 4 に示すように、すべて同じ極性とすればよい。

Fig. 6 Driving point mobility and odd/odd modal cluster filtering before and after cluster feedforward control

図5は、実験で使用したランダム加振力のスペクトルおよび駆動点モビリティが示されている。図3(a)の数値解析結果と図5(b)の実験結果を比較すると明らかなように、これらは良い一致を呈しており、数値解析で使用したモデルが妥当であることを示している。

奇/奇モード群のクラスタ制御結果を図6に示す。図6(b)はクラスタフィルタリングされた奇/奇モード群のスペクトル特性が示されており、22個の振動モードの中から奇/奇モードのみが6個〔(1, 7)モードだけは外乱作用点と当該モードのノードライン上にほぼ合致してしまったため顕著ではない〕抽出されている。これら奇/奇モード群も、図6(c)に示すように、SISO クラスタ・フィードフォワード制御により、いずれのモードも $-25 \sim -30$ dB のレベルにまで抑制されている。

図6(a)はクラスタ制御を講じた後の駆動点モビリティを示しており、図5(b)の非制御モビリティ特性と比較すると明らかなように、奇/奇モードのみが非干渉制御されているので、他のクラスタに所属するモードにはほとんど影響がないことがわかる。さらに、理論的に達成できる最適駆動点モビリティ特性〔図3(b)〕と実験結果である図6(a)とを比較すると明らかなように、これらの特性は非常に類似していることがわかる。実験においては、図2に示されている最適制御則の具現化を図ったのではなく、Filtered- x LMS アルゴリズムにより極値探索した結果であるの

で、最適状態に至るプロセスは異なるものの、到達したゴールは非常に類似していることから、Filtered- x LMS アルゴリズムが良好に作動したものと考えられる。

図7は、この際に得られた時刻歴応答波形を示す。図7(a)は加振器・パネル間に装着したロードセルで検出した外力波形を示しており、このスペクトル解析結果が図5(a)に示されている。図7(b)および(c)は、クラスタ制御前後の外乱駆動点における速度波形を示している。この場合、全モードの内、奇/奇モード群しか抑制していないので、速度波形を見るかぎりではそれほど顕著な差異は生じていない。これに対して、フィードフォワード制御効果を追及する上で、誤差信号に相当する奇/奇モードクラスタ信号が図7(d)および(e)に示されており、制御前後では大きな相違が見られる。

Filtered- x LMS アルゴリズムを基調とするフィードフォワード制御系を構築するに当たり、本実験においては四つのセンサ/アクチュエータを使用しているので、見掛け上、4入力4出力のMIMO フィードフォワード制御系となる。しかしながら、ここで使用されているセンサ/アクチュエータは、在来のMIMO系としてではなく、SISO系として運用されている点に注意されたい。その理由は、まずフィルタリングにおいては、四センサの出力を単純加算することにより、いわゆる空間フィルタを構成し所望のクラスタ出力を得ているので、出力数は一つである。同様に、アクチュエーションにおいても、四つのアクチュエータを単一の制御器により駆動することで、対象とするクラスタのみの励起を行っている。したがって、見掛け上は4入力4出力MIMO系に見えるが、実際は1入力1出力SISO系として作動している。

速度センサおよびアクチュエータの極性を、図4に示すように、 r_1 を基準として(+-+), (+--+), (+--+)と変更することにより、おのおの奇/偶モーダルクラスタ、偶/奇モーダルクラスタ、偶/偶モーダルクラスタの制御が可能となる。

3.2 全クラスタの抑制 本節では、3.1節で用いた四つの速度センサ/アクチュエータを用いて、全クラスタの抑制を図る。この場合、四つのSISO フィードフォワード制御系を構築することにより、すべてのクラスタ制御、ひいてはクラスタの構成因子であるすべての振動モードが抑制できるので、その手順について記そう。

ステップ1 4個の速度センサ出力を、図4に示すクラスタの極性に応じて加減算することにより、4種

Fig. 7 Time histories of disturbance force, driving point velocity and odd/odd modal cluster filtering before and after cluster feedforward control

Fig. 8 Driving point mobility and each modal cluster filtering before and after cluster feedforward control

類のクラスタ信号, $e_{o/o}$, $e_{o/e}$, $e_{e/o}$, $e_{e/e}$ を得る。

ステップ2 4個のアクチュエータの駆動極性を考慮し, これらを単一信号で同時駆動させ, アクチュエータ駆動信号・クラスタ出力信号間の4種類のシステム同定を行う。

ステップ3 供試パネル駆動力 f_p を Filtered- x LMS アルゴリズムの参照信号とし, 図4に示す極性にしたがってアクチュエータを駆動することでクラスタアクチュエーションを行う。

ステップ4 各クラスタ信号を最小とするように Filtered- x LMS アルゴリズムを作動し, FIR フィルタの重み係数を決定する。次に, FIR フィルタ出力, すなわち制御信号 $u_{o/o}$, $u_{o/e}$, $u_{e/o}$, $u_{e/e}$ の極性を, 各クラスタの特性に応じて変化させ, 各アクチュエータ

Fig. 9 Time histories of disturbance force, driving point velocity and each modal cluster filtering before and after cluster feedforward control

のパワー増幅器に入力する。すなわち, センサ/アクチュエータ設定点 r_1 を基準として, 各アクチュエータには, 例えば奇/奇モード群に対しては $\{+u_{o/o}, +u_{o/o}, +u_{o/o}, +u_{o/o}\}$ を, 奇/偶モード群に対しては $\{+u_{o/e}, +u_{o/e}, -u_{o/e}, -u_{o/e}\}$ というように, クラスタの特性に合わせて, 極性を変えて入力すればよい。

図8は4クラスタを一括して抑制した場合の駆動点モビリティおよび各クラスタ出力のスペクトル特性を示している。図5(b)および図8(a)に示す駆動点モビリティを比較すると明らかなように, クラスタ・フィードフォワード制御を講ずることで, 対象周波数領域に存在するすべての振動モードが十分に抑制されていることがわかる。また, 図8(b)~(e)に示されている各クラスタ信号を見ると, いずれのクラスタ信号も満足のいく抑制が得られている。

この状態での時刻歴応答を示したのが図9である。奇/奇モードクラスタのみを抑制した際の駆動点速度波形 [図7(c)] とは異なり, 図9(c)に示されている駆動点速度波形および図9(d)~(g)に示されているいずれのクラスタ信号も十分に抑制されている。

Fig. 10 Driving point mobility and each modal cluster filtering before and after conventional multi-SISO feedforward control

3.3 在来の SISO フィードフォワード制御 次に比較のために、クラスタ・フィードフォワード制御系と同一の条件で、通常の 4 SISO フィードフォワード系を構成し実験を行った。その際に得られた駆動点モビリティおよび各クラスタスペクトルを図 10 に、時刻歴応答波形を図 11 に示している。この場合、各 SISO 制御系は対象周波数領域に存在する特性の異なる 22 個すべての振動モードを一括して制御しようと試みる結果、制御系の巨大化、複雑化は避けられず、そのために実験で使用している DSP (TI 社製 C 40) に対する負担が過剰なものとなり、系同定を含めてパフォーマンスを十分に高めることができない結果となっている。これに対して、クラスタ・フィードフォワード制御の場合、同族の因子のみを対象とするので簡素

Fig. 11 Time histories of disturbance force, driving point velocity and each modal cluster filtering before and after conventional multi-SISO feedforward control

な SISO 制御系で対応でき、各クラスタ出力はほぼ -30 dB のレベルにまで抑制されている。ちなみに、在来形の 4 SISO フィードフォワード制御では、偶/奇モードクラスタでは -12 dB、奇/偶モードクラスタに至っては -4 dB のレベル程度までしか抑制することができない。

4. 結 言

分布定数系平板構造物の振動制御を目的として、クラスタ・フィードフォワード制御法を提案し、当該手法に基づく制御効果を明らかにした。まず、クラスタ・フィードフォワード制御法の最適制御則を導出するとともに、数値解析の観点より理論的に達成できるクラスタ制御効果を明らかにした。次いで、Filtered- x LMS アルゴリズムを基調とするクラスタ・フィードフォワード制御系を構築し、振動放射音パワーの最大支配因子である奇/奇モードクラスタの抑制効果を実証するとともに、この際に達成された制御効果と、理論的に達成される効果とが満足のいく合致をみた。次に、奇/奇モードクラスタを抑制した 4 個の速度センサ/アクチュエータを使用し、全クラスタを制御する手法を提示した。全クラスタの制御は、その構成因

子である全振動モードの抑制を意味し、当該手法を使用することで、全振動モードの抑制ができることを立証した。最後に、比較のために、在来形 SISO フィードフォワード制御法を構築し、これによる振動制御を行った。しかしながら、クラスタ・フィードフォワード制御と全く同一の条件を使用しながら、在来形 SISO フィードフォワード制御法を適用すると、DSP には演算処理機能を越えた過剰な負担がかかり、十分な制御性能を得ることはできないことが判明した。

なお、本実験を進めるにあたり、東京工科大学卒業生楠岡忠幸君には多大な協力をいただいた。ここに感謝する次第である。

文 献

- (1) Morgan, D. R., *IEEE ASSP*, 28 (1980), 454-467.
- (2) Widrow, B. and Stearns, S. D., *Adaptive Signal Processing*, (1985), 288-294, Prentice Hall.
- (3) Widrow, B., ほか 2 名, *Proc. IEEE*, 63 (1975), 1642-1716.
- (4) Elliott, S. J., ほか 2 名, *IEEE ASSP*, 35 (1987), 1423-1434.
- (5) Sommerfeldt, S. D. and Tichy, J., *J. Acoust. Soc. America*, 88 (1990), 938-945.
- (6) Fu, K. S., *IEEE*, AC-16-1 (1971), 70-72.
- (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・ほか 3 名, 機論, 59-567, C (1993), 1646-1653.
- (10) 田中信雄・ほか 3 名, 機論, 60-573, C (1994), 3444-3451.
- (11) Meirovitch, L. and Baruh, H., *J., Optimization Theory Appl.*, 39-2 (1983), 269-291.