

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560785

研究課題名（和文） スマート構造の準能動型制御システム（エネルギー消費の低減化に関する研究）

研究課題名（英文） Semi-active Vibration Suppression System for Smart Structures (A Research for Reducing Energy Consumption)

研究代表者

大久保 博志 (OKUBO HIROSHI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40094502

研究成果の概要（和文）：

宇宙望遠鏡等の宇宙構造の超高精度形状制御に用いるために、圧電素子を用いた振動制御システムを開発した。本研究では、受動型の安定性と電力消費の効率性を保ちながら、より高い振動減衰性能を実現する準能動型の制振システムを提案する。スライディングモード制御に基づく切換え制御により収束を加速する。数値シミュレーションおよび実験室モデルによる制振実験を行い、提案する準能動型制振システムの有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

A semi-active vibration suppression system comprising piezoelectric elements is developed for high-precision shape control of space structures such as space antenna. In this study, we propose a semi-active vibration control law to improve the damping effect while maintaining the stability and energy efficiency of the passive control system. The proposed control law is based on a sliding-mode control that accelerates the convergence of the system by using switching functions. The results of the numerical simulations and hardware experiments on a laboratory model show that the proposed semi-active vibration control system is practically effective in damping vibrations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：柔軟宇宙構造物 振動制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 「スマート構造」は、圧電材料や形状記憶合金などをセンサ・アクチュエータとして表面あるいは内部に配置することにより、形状や振動を制御する機能を備えた構造である。「スマート構造」の宇宙構造への適用に関する研究は、制御の分野では柔軟宇宙構造物の制御理論として1980年代以降の先端制御理論の発展を導いてきた。

(2) 「スマート構造」を宇宙構造物に適用するために、解決しなければならない課題は多い。なかでも重要な課題として、能動制御に必要とされるエネルギー消費の抑制があげられる。能動制御を行わず、振動の機械エネルギーを電気エネルギーに変換し、熱エネルギーとして消散させる受動型制振システムの研究も行われているが、制振性能は低く制約されている。能動型制御システムでは高い制振効果が得られるものの、アクチュエータを駆動する電力消費が、リソースの制約が大きい宇宙空間での利用については制約となる。消費電力を考慮した効率的な振動制御システムの研究開発が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、受動型と能動型の制振制御を融合させた準能動型の制振制御システムについて研究し、エネルギー効率を飛躍的に高めた切換え型の制御側を提案する。準能動型制御により、優れた制振効果と低いエネルギー消費を両立させるとともに、安定性に優れた準能動型の制御システムを提案し、その有効性を実験モデルにより実証する。

3. 研究の方法

宇宙アンテナなどの宇宙構造物の超精密制御にスマート構造システムを導入するための基礎研究を行った。

- (1) 柔軟構造の準能動型制振制御系の設計法の研究
- (2) 実験室モデルを用いたスマート構造の準能動型制振実験と省エネルギー効果の検証
- (3) 多数の準能動型制御系を分布させた場合の制御系設計法、圧電素子配置の研究
- (4) 多モードの制振に有効な多数の準能動型圧電素子を用いた制振制御の研究

4. 研究成果

(1) はじめに

圧電素子による柔軟構造物の振動制御法のうち、一般に能動型では大きな制振力が得られるが、素子の駆動によるエネルギー消費や安定性に問題がある。一方、受動型は、消費エネルギーが少なく安定性も優れているが制振力が小さい。受動型の安定性を保ち

つつ制振効果を向上させる準能動的な制振手法は、省エネルギー性も優れ、宇宙構造物への適用が検討されている。本研究では、スライディングモード制御に基づく切換え制御則により、多モード制振にも対応した振動制御が可能となる。柔軟構造物として有限要素法によりモデル化したはりを対象として、その制振効果を検証した。

(2) 機械エネルギーと電計エネルギーの交換系

① 圧電素子による電気共振回路

圧電素子は「ひずみをあたえると電圧を発生する」という圧電効果と、「電圧をあたえるとひずみを発生する」という逆圧電効果という性質を持つ。この性質により機械エネルギーを電気エネルギーに変換すること、またその逆が可能になる。

Fig. 1 に示すように、本研究で用いる圧電素子は z 方向に電極を持ち、 x 方向にひずみを生じる。この解析の基本となる圧電方程式は次のように表される。

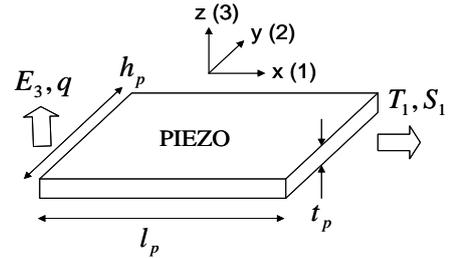


Figure 1. Piezoelectric element with potential difference applied across top and bottom surfaces.

$$\begin{cases} q = \epsilon_{33}^T \cdot E_3 + d_{31} \cdot T_1 & (1) \\ S_1 = d_{31} \cdot E_3 + s_{11}^E \cdot T_1 & (2) \end{cases}$$

ここで S_1 は x 方向のひずみ、 T_1 は x 方向の応力、 E_3 は z 方向の電界、 q は素子の単位面積当たりの電荷であり、 s_{11}^E は x 方向の弾性コンプライアンス、 d_{31} は圧電定数、 ϵ_{33}^T は誘電率である。

Fig. 2 に示すように、圧電素子に抵抗 R とインダクタンス L を接続すると、素子は電気エネルギーと機械エネルギーを変換する特性を持つ。よって、以下のように素子の弾性コンプライアンス s_{11}^{SU} が、回路の特性を含む形で表せる。

$$s_{11}^{SU} = s_{11}^E (1 - k_{31}^2 \bar{Z}_{EL}(s)) \quad (3)$$

$$Z_{EL}(s) = \frac{Ls + R}{LC_p^T s^2 + RC_p^T s + 1} \quad (4)$$

$$\bar{Z}_{EL}(s) = Z_{EL}(s) / Z_D(s) = Z_{EL} \cdot s C_p^T \quad (5)$$

ただし、 k_{31} は材料電気機械結合係数であり、素子中に蓄えられる電気エネルギーと機械エネルギーの比を表し、圧電素子の特性を表す指標として用いられる。

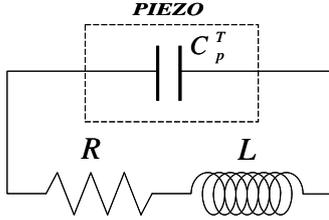


Figure 2. Resonant shunted piezoelectric with resistor and inductor in series.

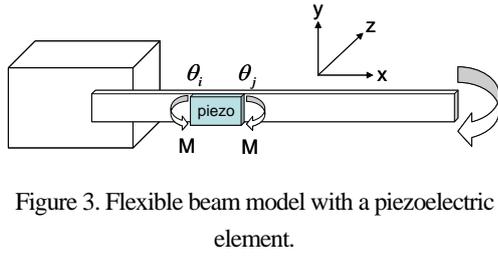


Figure 3. Flexible beam model with a piezoelectric element.

② 共振回路を用いた受動型制振制御

圧電素子は、圧電効果・逆圧電効果という特性を持つことから、この特性によって、機械エネルギーを電気エネルギーに、また、その逆への変換が可能になる。Fig. 3に示すように、外部回路に接続した素子を片持ちはりに取り付けただけの場合について考える。はりの片側に、節点*i* から節点*j* まで圧電素子を貼り付けたモデルについて考える。このとき、圧電素子を貼り付けたことによる質量の変化は微小であり元のはりのモード形状に影響しないものとする。

はりに曲げが生じると、はりに貼り付けた圧電素子にも曲げが生じ、その曲げ応力としてモーメントが生じる。このとき素子中のたわみ角の変化率 $d\theta/dx$ が一定であると考えると以下の様になり、

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\theta_j - \theta_i}{l_p} \quad (6)$$

素子の両端における曲げモーメントは次式で表せる。

$$M_p = -E_p(s)I_p \frac{d\theta}{dx} = -E_p(s)I_p \frac{\theta_j - \theta_i}{l_p},$$

$$E_p(s) = \frac{1}{s_{11}(s)} \quad (7)$$

ただし、 I_p は圧電素子の断面二次モーメント、 E_p は圧電素子の縦弾性係数である。

これをフィードバック力とする各振動モードの運動方程式は次式で表わされる。

$$\ddot{z}_i + \omega_i^2 z_i + E_p(s) \frac{I_p}{\mu_i l_p} (\phi_{ij} - \phi_{ii})^2 \cdot z_i = F_i \quad (8)$$

この伝達関数は、動吸振器を付加した振動系と相似形になり、動吸振器の定点理論に基いた近似解法により得られた以下の式から、外部回路の最適なパラメータ以下の様に設定できる。

$$L_{opt} = \frac{1}{(\omega_1^E)^2 C_p^S} \cdot \frac{1}{1 + K_{31}} \quad (9)$$

$$R_{opt} = \frac{1}{\omega_1^E C_p^S} \cdot \frac{\sqrt{2K_{31}}}{1 + K_{31}} \quad (10)$$

(3) スライディングモード制御

本研究で提案する準能動制御では、外部から直接的に力を加えることはない。すなわち、系に対して入力を加えることなく制御を行うものである。よって、スライディングモードで必要とされる切換え超平面及びそれに基いた切換え入力のうち、前者の設計が重要になる。超平面の設計法は数多く存在するが、対象とする系によって、また、目標とする動特性によって最適な方法は変わる。本研究では、シミュレーションによる比較から、極配置法を用いた設計法を採用して制御を行った。

スライディングモード制御 (Sliding Mode Control) は、条件を定義して設計した切換え超平面に状態量を拘束させることで低次元化し、漸近安定へと導く制御方式である。スライディングモード制御において主に重要なことは、「最適超平面の設計」、「スライディングモードコントローラの設計」の二つである。超平面の設計方法は様々なものが考案されており、対象とする系や目標とする動特性によって設計法を変える必要がある。本研究では、極配置法を用いた設計法得られた超平面を採用する。

式(8)で表わされるシステムのスライディングモードを伴う可変構造制御系は、切換関数 σ_k の符号によって支配される。切換関数は線形関数となり、

$$\sigma_k \equiv S_k x_k = \begin{Bmatrix} \omega_k & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z_k \\ \dot{z}_k \end{Bmatrix} \quad (11)$$

前述の切換関数 σ_k について $\sigma_k = 0$ ($k = 1, 2, \dots, n$) を満たす超平面をモードの数 n だけ定義する。このとき、常に $\sigma_k \dot{\sigma}_k \leq 0$ となるように電圧を自由に制御できるなら、位相平面において系を原点に向かわせるような制御ができる。

ここで、次式のリアプノフ関数 L を導入する。

$$L \equiv \sum_{k=1}^n v_k \sigma_k^2 \geq 0 \quad (12)$$

v_k は正の重み付け定数である。 L の時間微分が

$$\dot{L} = gV_a + (\text{small terms not including } V_a) \quad (13)$$

$$g = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^j \phi_{ik} \frac{2E_p(s)I_p}{\omega_k \mu_k l_p b_p |w_j - w_i|} \sigma_k \quad (14)$$

で表わされることを利用することで、Fig. 4 の回路に対して以下の切換え制御則が得られる。

$g \leq 0$ のとき、 $V_a \geq 0$ でスイッチをON

$g \geq 0$ のとき、 $V_a \leq 0$ でスイッチをOFF

以上のように、共振回路におけるスイッチングのメカニズムにより、スライディングモード制御を用いた準能動制御が達成される。

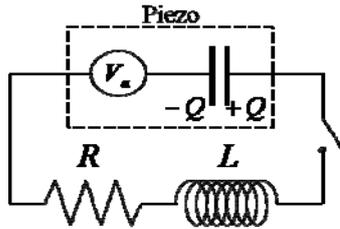


Figure 4. Resonant shunted piezoelectric with resistor, inductor and switch in series.

(4) 片持ちはりの多モード振動制御

外部回路を持つ圧電素子を貼り付けた片持ちはりのモデルをFig. 5 に、はりと圧電素子の諸元を表1に示す。圧電素子の貼り付け位置は、はりの固定端 ($x = 2.5 - 32.5$ mm) とする。1次モードについて、共振回路の最適なパラメータは、

$L_{opt} = 1.10 \times 10^5$ (H), $R_{opt} = 6.92 \times 10^5$ (Ω) となった。

シミュレーションによる検討の結果、受動制御が共振回路を設計した振動モードに対してのみ有効であるのに対して、スライディングモードによる切換え制御は、単モード共振回路を用いて、複数の振動モードの制振が可能であることが示された。

Fig. 6 に、はりの先端変位の1次モードおよび2次モ

ードの応答スペクトルについて、非制御自由振動、受動制御(1次モード制振器, 1次・2次モード並列)、準能動制御(1次モード制振器, 1次・2次モード並列)の場合を比較して示す。

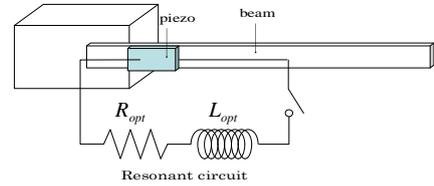


Figure 5. Cantilevered beam with resonant shunted piezoelectric.

Table 1. Specifications of beam and piezoceramic element.

Beam	Length	4.50×10^{-1} (m)
	Width	3.00×10^{-2} (m)
	Thickness	3.00×10^{-4} (m)
	Density	7.86×10^3 (kg / m ³)
	Young's modulus	206×10^9 (N / m ²)
Piezo-ceramic element	Length	3.00×10^{-2} (m)
	Width	3.00×10^{-2} (m)
	Thickness	2.00×10^{-4} (m)
	Density	7.40×10^{-3} (kg / m ³)
	Young's modulus	58.0×10^9 (N / m ²)
	d_{31}	-1.95×10^{-10} (m / V)
	k_{31}	39.0×10^{-2}
ϵ_{33}^T	$2130 \times \epsilon_0$ (C · m / V)	
b_p	5.62×10^7 (N / C)	

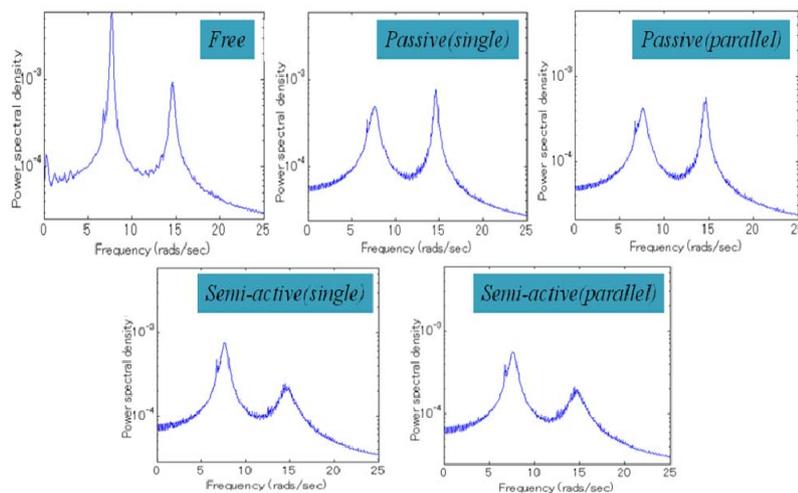


Figure 6. Power spectral densities of beam-tip displacements (1st and 2nd mode responses).

(5) 実験室モデルによる振動制御実験

表 1 に示す緒元の片持ち柔軟はりには圧電素子と共振回路を取り付け、制振実験を行った。実験装置の概要をFig. 7に、はり先端の変位応答の周波数応答をFig.8に示す。スイッチング回路を使用する準能動型制振は、共振周波数の周囲で、受動型制振よりも優れた制振効果があることが示された。

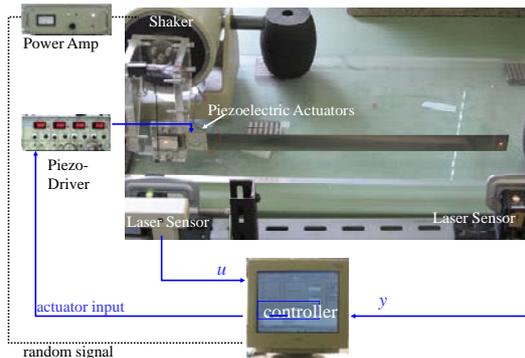


Figure 7. Experimental setups.

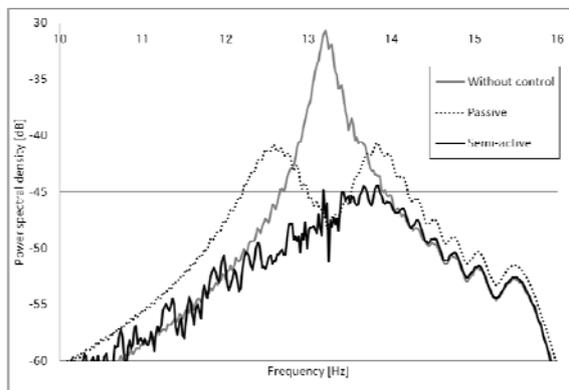


Figure 8. Power spectral densities of beam-tip displacements (1st mode response).

しかしながら、2次振動モードに対しては準能動型制振の有効性は確認できなかった。その理由は、センサーノイズや信号の遅延などの影響により、スイッチングが適切に行われなかったことが原因と考えられ、今後さらに研究が必要である。

(6) まとめ

圧電素子と共振回路で構成する受動的制振システムに対して、スライディングモード制御の切り換え制御則を回路のスイッチングによって実現する準能動制御について研究した。

① 数値シミュレーションにより、提案する制

御アルゴリズムは、単一の共振回路を用いた場合にも、多モード振動制御に有効であることを示した。

② 実験室モデルを用い、提案手法が1次振動モードの制振に対して有効であること、受動型制振に比べて優れていることを示した。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計6件)

① H. Okubo, H. Yano, and T. Itoh: Semi-active Vibration Suppression for Smart Structures with Sliding Mode Control, 23rd International Conference on Adaptive Structures and Technologies, 査読無, October 2012, Nanjing, PR China, 9 pages.

② S. Kwon, H. Okubo, T. Shimomura: Pointing Control of Spacecraft Using Two Single-Gimbal Control Moment Gyros, Trans. JSASS, Aerospace Tech. Japan, 査読有, Vol. 8, No. ists27, 2012, Pd_105-Pd_111.

③ T. Itoh, T. Shimomura, and H. Okubo: Semi-active Vibration Control of Smart Structures with Sliding Mode Control, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 5, 2011, 716-726.

④ H. Okubo and T. Itoh: Semi-active Vibration Control of Smart Structures with Piezoelectric Elements, Proceedings of the 22nd International Conference on Adaptive Structures and Technologies, 査読無, October 10-12, 2011, Corfu, Greece, 10 pages.

⑤ S. Kwon, T. Shimomura, and H. Okubo: Pointing control of spacecraft using two SGCMGs via LPV control theory, Acta Astronautica, 査読有, 68, 2011, 1168-1175.

⑥ S. Kwon, Y. Tani, H. Okubo, and T. Shimomura: Fixed-Star Tracking Attitude Control of Spacecraft Using Single-Gimbal Control Moment Gyros, American Journal of Engineering and Applied Sciences, 査読有, 3[1], 2010, pp.865-871.

〔学会発表〕(計5件)

① 大久保博志, 伊藤拓司, スマート構造の準能動多モード振動制御, 第54回構造強度に関する講演会, 2012年8月1-3日, 熊本. 6 pages

② 大久保博志, 佐々木友矩, 適応型セルフ

センシング圧電アクチュエータを用いたスマート構造の振動制御, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 9-12 日, 金沢, 5 pages.

- ③ 大久保博志(招待講演): 航空宇宙におけるスマート構造, 第 52 回構造強度に関する講演会(特別講演), 2010 年 7 月 22 日, 鳥取, 講演集, pp. S1-S3.
- ④ 伊藤拓司, 尾林慶一, 大久保博志, スマート構造の準能動多モード振動制御, 日本機械学 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 6-9 日, 名古屋, 講演論文集, No. 6, 325-326.
- ⑤ T. Itoh, T. Shimomura, and H. Okubo, Semi-active Vibration Control of Smart Structures with Sliding Mode Control, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, August 17-20, 2010, Tokyo, No.10-203, 10 pages.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 博志 (OKUBO HIROSHI)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40094502