

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18760169

研究課題名（和文） センサと電源を用いないアクティブ振動制御システム

研究課題名（英文） Active vibration control without sensors and power sources

研究代表者

中野 公彦（NAKANO KIMIHIKO）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：90325241

研究成果の概要：本研究では、構造物を単純支持梁と仮定し、その曲げ振動を電源とセンサを用いることなく圧電トランスデューサによってその振動の能動制御を行うことを提案し、エネルギー収支と制振性能の面から、その実現可能性の検討を行うことを目的としている。梁の曲げ振動制御を行う時の状態方程式を導出し、圧電トランスデューサに加えられる電圧や流れる電流から梁のたわみなどの機械的状態量を推定するオブザーバ（カルマンフィルタ）と、最適レギュレータを設計した。数値計算を通じて、カルマンフィルタにより制御を行うことが可能であることを確認し、その制振性能も、制御を行う前に比べて良好であることを示した。同時に、その際に圧電素子に供給すべき電力を見積り、消費電力が負になることを示した。負の消費電力は、圧電素子に接続する電源を回生可能なものにすれば、回生電力が消費電力を上回ることを意味し、発電電力のみで能動制御を行うことができることを示唆している。また、解析対象としてきた単純支持梁と類似した 1m の長さのアルミ合金製の梁を用いて実験を行った。梁の中央部に圧電トランスデューサを貼り、三次モードに着目した能動制御を行った。回生電力が消費電力を上回る条件の下、制御なしの場合と比べて、振動を抑えることができることを示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,600,000	0	1,600,000
2007 年度	1,100,000	0	1,100,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	240,000	3,740,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：振動制御

1. 研究開始当初の背景

制振技術において、アクティブ制御を適用する試みは 10 年以上前から行われており、自動車および鉄道のアクティブサスペンション、高層ビルのアクティブマスダンパなど実用化した例も多い。しかし制御理論および

半導体回路性能の飛躍的向上という背景がありながらも、装置の大型化、設置およびメンテナンス費用の増大などの理由から、期待されたほど実用化は進んでいない。一方、スマート構造という概念でも知られるように、小型のアクチュエータを分散して構造物内

に設置してアクティブ制御を行う，分散型の新しい制御手法も提案されている．構造体にセンサやアクチュエータを取り付け，構造体自体が計測や制御などの知的行為を行うものである．圧電素子やブルーマスアクチュエータなど小型のアクチュエータを活用することが多く，アクティブマスダンパのような大型な装置を使用することがないため，今後の構造物の制御手法として発展が期待される技術である．しかしアクチュエータを多数設置する必要があるため，その数に対応するセンサの設置，それら装置に対する電源および信号ケーブルの設置などを考えると，システムの煩雑化を招く欠点がある．今後のアクティブ制御システムにはシステムハードウェアの簡略化が強く求められている．

一方，振動はエネルギーであり，アクチュエータによって振動から発電を行うことが可能である．また，発電量は入力振動に依存するため，電流などの電気的な状態量を測定し，オブザーバなどを用いて機械的状态量を推定すれば，センサを設置することなく，制御を行うことが可能になる．

2. 研究の目的

振動から発電を行い，そのエネルギーを用いてアクティブ制御を行うセルフパワー・アクティブ制御を，圧電素子による制御に適用する．また，圧電素子はセンサとしての機能を有していることが知られており，電流等の圧電素子内の電気的な状態量を計測すれば，オブザーバなどを用いて，機械的状态量を推定することができる．圧電素子以外に加速度計などのセンサを設置する必要がなくなるため，実質的にセンサレス制御が可能になる．セルフパワー・アクティブ制御とセンサレス制御を組み合わせることにより，電源とセンサを必要としない制御を実現し，より簡便なアクティブ制御を行うことを提案する．単純支持梁に圧電素子を貼り付けた系で，数値計算および実験により，提案するシステムの実現可能性を検討する．

3. 研究の方法

(1) 単純支持梁

図1に解析対象とする系を示す．構造物を厚さ t_b の単純支持梁と想定し，梁に取り付けた圧電トランスデューサ（素子）によって，曲げ振動を抑制することを考える．梁の左端から p_t の位置にて，周期的な点荷重 f_p を受け，それによって振動が発生するものとする．圧電トランスデューサの長さを l_t ，梁の左端から圧電トランスデューサまでの距離を p_t とする．なお， y は軸方向座標を表す．

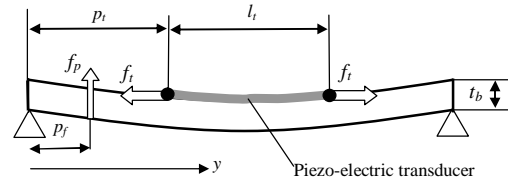


図1 単純支持梁と圧電トランスデューサ

圧電トランスデューサの出力を f_t とすると，これが梁に与える分布モーメント $M(y)$ は以下ようになる．

$$M(y) = -f_t \frac{t_b}{2} [H(y - p_t) - H(y - p_t - l_t)] \quad (1)$$

ここで， $H(y)$ は，ヘビサイドのステップ関数であり，以下のように定義される．

$$H(y) = \begin{cases} 1, & y > 0, \\ 0, & y < 0. \end{cases} \quad (2)$$

曲げ振動の方程式は以下ようになる．

$$EI \frac{d^4 w}{dy^4} + \rho t_b b_b \frac{d^2 w}{dt^2} = \delta(y - p_f) f_p + \frac{d^2 M(y)}{dy^2} \quad (3)$$

ここで， b_b ， w ， y ， E ， I ， ρ は，それぞれ，梁の幅，たわみ，軸方向座標，縦弾性係数，断面二次モーメント，密度を示す．また， $\delta(y)$ は以下のようなデルタ関数である．

$$\delta(y) = \begin{cases} 1, & y = 0, \\ 0, & y \neq 0. \end{cases} \quad (4)$$

式(1)より，モーメントの2階微分は以下ようになる．

$$\frac{d^2 M(y)}{dy^2} = -f_t \frac{t_b}{2} \left[\frac{d\delta(y - p_t)}{dy} - \frac{d\delta(y - p_t - l_t)}{dy} \right] \quad (5)$$

定常正弦波振動を想定すると，単純支持梁のたわみは以下のような形式で表現できる．

$$w(y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n \sin(k_n y) \quad (6)$$

ここで， s はラプラス演算子であり， k_n は n 次モードの時，以下ようになる．

$$k_n = \frac{n\pi}{l_b} \quad (7)$$

式(6)を式(3)および(5)に代入すると，以下の式が得られる．

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{\infty} (k_n^4 EI + s^2 \rho t_b b_b) W_n \sin(k_n y) \\ &= \delta(y - p_f) F_p - \left[\frac{d}{dy} \delta(y - p_t) - \frac{d}{dy} \delta(y - p_t - l_t) \right] F_t \frac{t_b}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 F_p 、 F_t はそれぞれ、 f_p 、 f_t の振幅を表す。式(8)の両辺に $\sin(k_n y)$ を乗じ、梁の長さ l_b に対して積分を行うと、以下のようになる。

$$l_b \sum_{n=1}^{\infty} (k_n^4 EI + s^2 \rho t_b b_b) W_n = 2F_p \sin(k_n p_f) - F_t t_b k_n \{ \cos[k_n(p_t + l_t)] - \cos(k_n p_t) \} \quad (9)$$

さて、 n 次モード近傍のみを考慮すると、 W_n は以下のようになる。

$$W_n = \frac{2F_p \sin(k_n p_f) - F_t t_b k_n \{ \cos[k_n(p_t + l_t)] - \cos(k_n p_t) \}}{L_{ms} (\omega_{msn}^2 + s^2)} \quad (10)$$

ここで、 L_{ms} と ω_{msn} は、以下のように、梁の質量と n 次モードの不減衰固有角振動数を表す。

$$L_{ms} = \rho t_b b_b l_b \quad (11)$$

$$\omega_{msn} = k_n^2 \sqrt{\frac{EI l_b}{L_{ms}}} \quad (12)$$

さて、 n 次モードの梁に、減衰比 ζ_{msn} の減衰が存在すると想定し、余弦項を変形すると、 W_n は以下のようになる。

$$W_n = \frac{1}{L_{ms}} \frac{2F_p \sin(k_n p_f) - 2F_t t_b k_n \sin\left(k_n \frac{l_t}{2}\right) \sin\left[k_n \left(p_t + \frac{l_t}{2}\right)\right]}{\omega_{msn}^2 + 2\omega_{msn} \zeta_{msn} s + s^2} \quad (13)$$

トランスデューサの変形量 q_{mt} と梁のたわみの間には以下の関係がある。

$$q_{mt} = \int_{p_t}^{p_t+l_t} -\frac{t_b}{2} \frac{d^2 w}{dy^2} dy = t_b k_n W_n \sin\left(k_n \frac{l_t}{2}\right) \sin\left[k_n \left(p_t + \frac{l_t}{2}\right)\right] \quad (14)$$

ここで、

$$\lambda = t_b k_n \sin\left(k_n \frac{l_t}{2}\right) \sin\left[k_n \left(p_t + \frac{l_t}{2}\right)\right] \quad (15)$$

と定義し、式(14)を(13)に代入すると、以下の運動方程式が得られる。

$$\frac{L_{ms}}{2\lambda^2} (\ddot{q}_{mt} + 2\omega_{msn} \zeta_{msn} \dot{q}_{mt} + \omega_{msn}^2 q_{mt}) = \frac{1}{\lambda} \sin(k_n p_f) f_p - f_t \quad (16)$$

(2) 圧電トランスデューサ

圧電素子の d_{31} 方向を利用したトランスデューサを利用する。電極面の電荷を q_{et} 、応力が働く方向の機械的な伸び(変位)を q_{mt} と

すると、トランスデューサが発生する力 f_t と、電極面の電圧 v は式(17)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} f_t \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{mt}} & -D_{31} \\ -D_{31} & \frac{1}{C_{et}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{mt} \\ q_{et} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

ここで、 C_{mt} 、 C_{et} 、 D_{31} は、それぞれ、トランスデューサの機械コンプライアンス、電気キャパシタンス、電気機械結合係数である。
(3) アクティブ制御

圧電トランスデューサに電圧 u を加えることによって、アクティブ制御を行う。電源とトランスデューサ間のインピーダンスに抵抗成分 R_{et} のみが含まれるとすると、電圧 v は以下のように表されることになる。

$$v = -R_{et} \dot{q}_{et} + u \quad (18)$$

これより回路方程式は以下のようになる。

$$u = \frac{1}{C_{et}} q_{et} + R_{et} \dot{q}_{et} - D_{31} q_{mt} \quad (19)$$

式(17)より制御用トランスデューサの出力 f_t は以下のようになる。

$$f_t = \frac{1}{C_{mt}} q_{mt} - D_{31} q_{et} \quad (20)$$

系全体の状態方程式は以下のようになる。

$$\dot{X} = AX + B_w f'_p + B_u u \quad (21)$$

ここで、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{D_{31}}{R_{et}} & -\frac{1}{R_{et} C_{et}} & 0 \\ -\omega_{msn}^2 - \frac{2\lambda^2}{L_{ms} C_{mt}} & \frac{2D_{31}}{L_{ms}} & -2\omega_{msn} \zeta_{msn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{2 \sin(k_n p_f)}{L_{ms}} \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_{et}} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

$$X = [q_{mt} \quad q_{et} \quad \dot{q}_{mt}]^T \quad (25)$$

(4) 最適化制御

以下の線形2次形式の評価関数を最小にする制御器を設計する。ここで、 Q と R は重み係数行列であり、その値は設計時に定める。

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + R u^2) dt \quad (26)$$

リカッチ型代数方程式の一意正定対称行列を P とすると、最適制御入力は以下のように定まる。

$$u = -K X \quad (27)$$

ただし,

$$K = R^{-1}B^T P. \quad (28)$$

(5) カルマン推定器

式(37)に示す通り, 最適化制御では, すべての状態量 X を計測する必要があるが, オブザーバにより, 計測できない状態量を推定すれば, 一部の状態量のみを計測することにより, 制御を行うことが可能になる. 制御入力 u は式(29)のように定められる.

$$u = K \tilde{X} \quad (29)$$

ここで, \tilde{X} は X の推測値である. カルマン推定器のゲインを L , 計測した状態量を Y と表すと, カルマン推定器内部の方程式は式(30)のようになる.

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + B_u u + L(Y - C\tilde{X} - D_u u) \quad (30)$$

計測可能な状態量を電流 \dot{q}_{et} とする. この時, C および D_u は以下のように定められる.

$$C = \begin{bmatrix} D_{31} & -1 & 0 \\ R_{et} & R_{et} C_{et} & \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$D_u = \frac{1}{R_{et}} \quad (32)$$

カルマン推定器のゲインは以下のように求められる.

$$L = SC^T V^{-1} \quad (33)$$

ただし, 行列 S は以下のリカッチ方程式の正定対称な解として得られる.

$$AS + SA^T - SC^T V^{-1} CS + B_w W B_w^T = 0 \quad (34)$$

ここで, W と V は, システム雑音および観測雑音のパワースペクトル密度である.

(6) 発電電力

トランスデューサに加えた電力, すなわち u と電流 \dot{q}_{et} を乗じたものを, 発電電力と考えることにした. この値の平均値が負である時, 回生量の方が多く, 電源を用いずにアクティブ制御が可能であることを示している.

4. 研究成果

(1) 諸数値

表1に示す諸数値を用いて, 計算を行った. アクティブ制御を行う際には, 圧電トランスデューサを電源(電圧源)と接続する. その接続回路の抵抗値 R_{et} を 0.1Ω と定める. 以下のように重み行列を定め, 最適化制御理論に従い, フィードバックゲインを決めた.

$$Q = \begin{bmatrix} 3 \times 10^{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$R = [1] \quad (36)$$

また, カルマン推定器は, システム雑音および観測雑音のパワースペクトル密度 W, V をそれぞれ, 1×10^{11} , 1 と定めて, オブザー

バゲイン L を求めた.

表1 数値計算に用いた諸数値

	記号	値
梁の長さ	l_b	1.0 m
トランスデューサ長	l_t	3.0cm
入力荷重の位置	p_f	0.1 m
梁の厚さ	t_b	1.0 cm
キャパシタンス	C_{et}	11.6 nF
コンプライアンス	C_{mt}	0.139mm/kN
電気機械結合係数	D_{31}	23.1kV/mm
ヤング率	E	71 GPa
断面二次モーメント	I	0.33 cm ⁴
梁の質量	L_{ms}	1.09 kg
電気抵抗	R_{et}	200Ω
n 次モードの減衰比	ζ_{msn}	0.02

(2) 周波数応答

図2に点荷重 f_p から, モード形状の振幅 W_n , すなわち, たわみの最大値の周波数応答を記す. なお, 3次モードのみを抽出したものととなっている. 横軸は, 3次モードの不減衰固有振動数(210.3Hz)で除した無次元周波数を表している. 全状態量をフィードバックしたアクティブ制御を行った時(Active), カルマン推定器を用いて, 電流値のみをフィードバックして最適化制御を行った時(Active with observer), また, 比較のため, 制御を行っていない時(Passive)の応答を記載した. アクティブ制御の方が, 制振性能が向上している. また, カルマン推定器を用いた時は, 全状態量をフィードバックしたアクティブ制御時よりも若干制振性能が悪化しているが, これはやむを得ないことである.

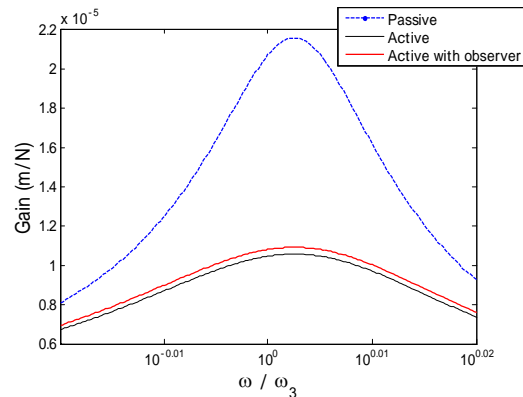


図2 計算によって求められた周波数応答

(3) 消費電力

図3に各周波数における平均消費電力を記す．負の値となっており，発電を行っていることがわかる．オブザーバを用いたアクティブ制御は，全状態量をフィードバックしたアクティブ制御時よりも性能が若干劣るが，発電を行うことは可能であることがわかる．

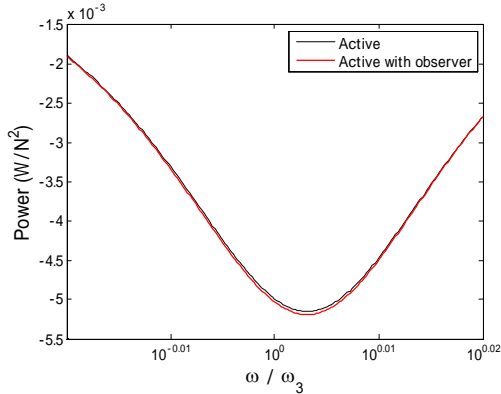


図3 計算によって求められた発電電力

(4) 実験装置

制振効果と消費電力の特性を確認するために，実験を行った．図4に実験装置の写真を示す．長さ1mのアルミ合金製の単純支持梁であり，その諸数値は表1に従う．梁の中央に圧電トランスデューサを貼り，その反対面に圧電式の加速度計を設置した．加速度計の出力は5kHzのサンプリング周波数にて，AD変換機を介して，パーソナルコンピュータ（以下，PC）に取り込まれる．また，PCより，DA変換機を介して出力された信号電圧に従って，電源が電圧を圧電トランスデューサに与える．なお，電源とトランスデューサの間には，200Ωの抵抗が設置されており，その両端電圧から電流を計測することにした．電源の電圧と計測した電流の値を乗じることにより，消費電力を求める．実験では，数値計算と同様に3次モードに着目し，また，実験装置および実験で用いた制御器の諸数値は，全て数値計算で利用した値と一致している．



図4 実験装置写真

(5) 実験結果

インパルスハンマにより，梁にインパルス入力を与えその後の，梁の横加速度を計測したものを図5に示す．なお，縦軸は，加速度を，インパルスハンマで与えた力で除して正規化した加速度である．比較のため，制御を行っていない時の加速度も示す．加速度の値は低減しており，圧電トランスデューサによるアクティブ制御により，制振性能が向上していることがわかる．また，0秒（打撃した時間）から2¹⁴計測点の加速度のパワースペクトル密度を求めた．それを図6に示す．3次モードでのピーク（200Hz付近）が低減していることがわかる．図7に制御を行った時の消費電力を示す．多くの時間において負の値となっており，回生電力が消費電力を上回っていることがわかる．

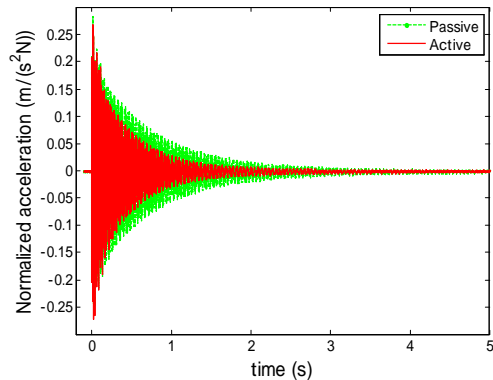


図5 加速度のインパルス応答

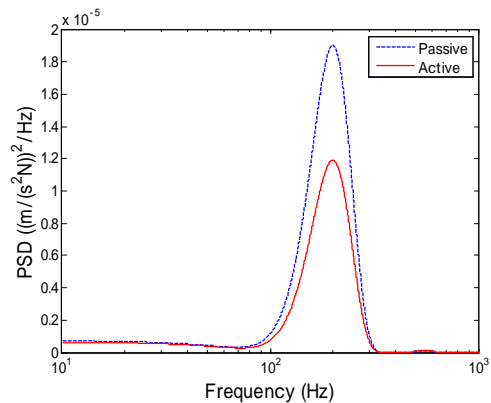


図6 加速度のパワースペクトル密度

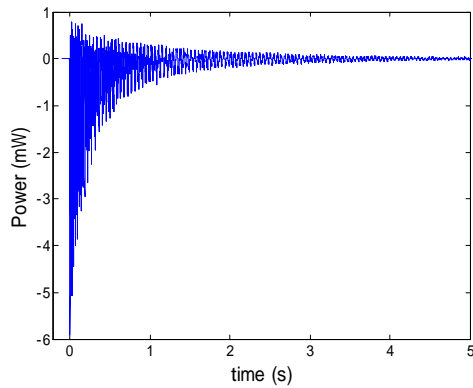


図7 実験によって求められた消費電力

(6) 研究成果のまとめ

電源を用いないアクティブ振動制御システムが可能であることを、数値計算および実験によって示した。さらに、センサを用いずに制御を行うことができることを、数値計算を通じて示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計5件)

有永剛, 中野公彦, 圧電素子による単純支持梁のエネルギー回生と制振, 日本機械学会中国四国支部講演会講演論文集, No.075-1, 307-308, (2007).

Kimihiko Nakano, Tsuyoshi Arinaga, Vibration Suppression Performances of Power Harvesting Systems Using Pie-zoelectric Transducers, Proc. of 14th International Conference on Sound and Vibration, Cairns Australia(CD-ROM), 326 (2007).

Kimihiko Nakano, A vibro-generator estimating the acceleration of the ambient vibration with disturbance accommodation control

中野公彦, 圧電素子を用いた構造物のセンサレス・セルフパワードアクティブ制御, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007 CD-ROM 論文集, No.07-8, 644 (2007).

Kimihiko Nakano, Self-powered active vibration control of a structure using a piezoelectric transducer, Proc. of 15th International Congress on Sound and Vibration, Daejeon Korea, 340-347 (2008).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

特になし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 公彦 (NAKANO KIMIHICO)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号: 90325241

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし