汎用マイコンモジュールによるスマート構造のセルフセンシング振動制御^{*1}

Self-Sensing Piezoelectric Actuation for Smart Structure using Affordable Micro-controller

南部 陽 介^{*2}・山 元 翔 太^{*3}・千 葉 正 克^{*2}

Yohsuke NAMBU, Shota YAMAMOTO and Masakatsu CHIBA

Key Words : Smart Structure, Self-sensing Vibration Control, Micro-controller

Abstract : The purpose of this paper is to verify the effectiveness of self-sensing piezoelectric actuation using an affordable micro-controller. In recent years, space structural systems have been required high precision and high functionality for advanced space missions. Vibration control is one of important issues to realize high mirror accuracy of antennas for a high-resolution observation and a high-capacity communication. Generally, active vibration control needs not only actuators and sensors, but also AD/DA converters and highly advanced arithmetic processing. However, it is difficult to mount complex and heavy devices on satellites. A compact and modularized unit for vibration control is necessary. Then, this study focused on an affordable micro-controller that is small, low power consumption and easily-available. And self-sensing actuation was chosen as the vibration control technique to reduce in size and weight of the control system. Numerical simulations and experiments to damp free decay vibration and harmonic vibration of a smart cantilever were demonstrated, and show that the presented approach is very useful for realizing the active vibration control unit.

1. 緒 言

本研究の目的は、マイコンを用いたセルフセンシング振動制御の有効性を示し、宇宙空間における超高精度スマート構造システムの実現に向けた基本技術を習得することである。近年の宇宙ミッションの高度化に伴い、構造システムにおいても、より高精度・高機能なものが求められている。特に、大容量通信を行うための宇宙用アンテナのような大型宇宙構造物においては、構造の柔軟性に起因する変形や振動が無視できない問題となるため、宇宙構造物の振動制御・形状制御は極めて重要な課題である。宇宙構造物の振動制御において、圧電素子を用いた制振手法が注目されている^{1, 2)}。圧電素子は、力を加えると電圧を発生する圧電効果と、逆に電圧を印加すると力を生じる逆圧電効果を併せ持つ。これらの効果を利用して、センサとアクチュエータ両方の機能を果たすことができる。

振動制御は、大別して、能動的、受動的、準能動的手法の3種類に分けることができる。能動的振動制御では、外部から適切なタイミングでエネルギーを供給することによって、高い制振効果を得ることができる。しかし、設計された制御系が適切でない場合には、系が不安定になってしまう恐れがある。さらに、外部電力、センサ、アクチュエータ、コントローラからなる複雑な制御装置が必要となる。圧電素

子を用いた能動的振動制御の中で特筆すべきは、一片の圧電素子にセンサとアクチュエータ両方の機能を持たせるセルフセンシング・アクチュエーションである。Dosehら³⁾やAndersonら⁴⁾は、ブリッジ回路により圧電素子の観測出力信号に混在する制御入力信号とセンサ出力信号を分離できることを示した。ブリッジ回路を用いたセルフセンシングの実装上の最も大きな問題は、ブリッジ回路のバランスを正確に保つことが困難であるという点である。これは、ブリッジ回路を構成する圧電素子のキャパシタンスの値の正確な推定が困難であることに起因する。この問題に対処するために、Takigamiら⁵⁾はブリッジ回路の参照キャパシタ側をソフトウェア上で構成する仮想ブリッジ回路を用いる手法を提案した。セルフセンシング振動制御では外部センサが不要なため、制振システムの小型・軽量化が実現できる。また、センサとアクチュエータの完全な共配置が可能であるため、閉ループ系の安定性に対して優れている。

受動的振動制御では、外部から系へエネルギーを注入しないため、系は常に安定である。しかし、能動的振動制御に比べ制振効果が小さく、外部環境の変化にも弱くなるという欠点がある。圧電素子を利用した受動的制振手法には、圧電素子が電圧発生器とキャパシタの特性を持つという性質を活かした特筆すべきものがある。Forward⁶⁾は、圧電素子をインダクタとレジスタから構成されるシャント回路に接続し、構造物の機械的エネルギーを電気回路に移動・消散させることで振動を減衰させる手法を提案した。さらに、Hagoodら⁷⁾は共振シャント回路を動吸振器として扱えることを示した。その後、様々なシャント回路を用いて

^{*1} © 2013 日本航空宇宙学会

平成 25 年 1 月 30 日原稿受付

^{*2} 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野

^{*3} 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻

振動減衰が試みられた^{8,9)}。

準能動的制振手法は、能動的制振手法と受動的制振手法の間である。Richard ら¹⁰⁾ や Clark¹¹⁾ は、圧電素子と受動回路の間にスイッチを付け、スイッチを適切なタイミングで開閉することで能動的に系のパラメータをコントロールし、受動的振動制御に比べて優れた制振効果を得ることができるスイッチング回路を提案した。Richard ら¹²⁾ , Corr ら¹³⁾ , Onoda ら¹⁴⁾ は、共振シャント回路とスイッチ制御を用いたエネルギー回生型準能動的振動制御手法を提案した。また、Makihara ら¹⁵⁾ は拡張システム方程式とカルマンフィルタ及びスイッチング回路を用いたセルフセンシングの手法を提案した。準能動的制御では系に対する直接的なエネルギーの注入はないため、能動的制御に比べ安定性に優れ、かつ受動的制御に比べ制振効果が高い。しかし、能動的に系のパラメータをコントロールするために、能動的制御と同様に、複雑な制御装置が必要である。受動的振動制御のように、外部からの電力供給を必要としない準能動的振動制御としては、Niederberger ら¹⁶⁾ により提案された自動スイッチング回路がある。さらに、Takeuchi ら¹⁷⁾ や Makihara ら¹⁸⁾ は圧電素子が発生する電力でスイッチング回路を制御するためのマイコンを駆動させる、セルフパワーデジタル振動制御の手法を提案した。マイコンを利用しているため、高度な制御則を実装することもできる。

以上で述べたように、圧電素子を用いた振動制御については多くの研究がなされてきた。しかし、宇宙構造物の振動制御への応用例は未だなく、実用化されていない。超高精度構造物を実現する方法として、スマート構造に対する需要があるにもかかわらず、その利用が実現していない理由のひとつに、宇宙実証されていない技術であることが挙げられる。従来の研究は、スマート構造の一部機能を抽出して、最も重要と考えられる機能のみを実証することに重点を置いたものであった。一方、宇宙構造物への応用を視野に入れた場合、スマート構造をシステムとして捉え、システムとしての制振性能を実証することが重要となる。つまり、ハイスpek的なパソコンやAD/DA 変換器をはじめとする多くの支援装置に補助されているスマート構造ではなく、自己完結したスマート構造の実証実験が必要である。

以上を鑑み、本研究では、スマート構造の宇宙実証を目指し、マイコンモジュールを用いたセルフセンシング振動制御の有効性を示すことを目的とする。本稿では、片持ち梁を対象に、シミュレーションと実験により本手法の有効性を検証する。

2. 振動制御則

2.1 セルフセンシング用ブリッジ回路 第 1 図は、ひずみ測定のための RC ブリッジ回路³⁾ である。ブリッジ回路内の電圧 v_1 , v_2 は、それぞれ、

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{C_p}{C_p + C_1}(v_p + v_c) \\ v_2 &= \frac{R_1}{R_1 + R_2}v_c \end{aligned} \quad (1)$$

第 1 図 ひずみ検出用 RC ブリッジ回路

と表せる。ここで、 R_1 はブリッジ回路調整のための可変抵抗値、 R_2 は固定抵抗値、 C_1 は固定コンデンサの静電容量、 C_p は圧電素子の静電容量である。 v_c は制御電圧、 v_p は機械的ひずみに比例する圧電素子の発生電圧である。センサ電圧 v_s を $v_s \equiv v_1 - v_2$ と定義すると、

$$v_s = \frac{C_p}{C_p + C_1}v_p + \left\{ \frac{C_p}{C_p + C_1} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right\} v_c \quad (2)$$

と表せる。ここで、ブリッジ回路の平衡条件

$$\frac{C_p}{C_p + C_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

を満たすように回路のバランスをとると、

$$v_s = \frac{C_p}{C_p + C_1}v_p \quad (4)$$

のように v_c の影響を取り除き、圧電素子のひずみに比例する信号 v_p のみを抽出することができる。

2.2 運動方程式 第 2 図のような圧電素子が貼付された片持ち梁を考える。圧電素子が貼付された片持ち梁の運動方程式は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \{ \rho_b A_b + \rho_p A_p g(x) \} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \{ E_b I_b + E_p I_p g(x) \} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ + b_p J_p \frac{\partial^2 (D_z g(x))}{\partial x^2} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $g(x)$ は 2 つのヘヴィサイドの階段関数 $H(x)$ を用いて、以下のように定義される。

$$g(x) \equiv H(x - x_2) - H(x - x_1) \quad (6)$$

また、 D_z は、ガウスの定理より、圧電素子の電荷 $q(t)$ を用いて、

$$D_z = \frac{q(t)}{d_p(x_2 - x_1)} \quad (7)$$

と表される。

梁の n 次モードまでを考慮した場合、梁の変位 $w(x, t)$ は、モード関数 $\Phi_k(x)$ 、モード変位 $\xi_k(t)$ を用いて以下のように表される。

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^n \xi_k(t) \Phi_k(x) \quad (8)$$

第2図 圧電素子が貼付された片持ち梁

なお、モード関数 $\Phi_k(x)$ は、圧電素子を貼付した片持ち梁のモード関数とする。このとき、梁の運動方程式は、

$$M_a \ddot{\xi}(t) + K_a \xi(t) = B_a^t q(t) + f(t) \quad (9)$$

となる。なお、式 (9) のマトリクスの定義は、付録 A.1 に載せている。

第1図に示すブリッジ回路を用いる場合、以下の式が成り立つ。

$$v_c(t) = v_p(t) + \frac{q(t)}{C_p} + \frac{q(t)}{C_1} \quad (10)$$

ここで、圧電素子の発生電圧は、

$$v_p(t) = -B_a^t \xi(t) \quad (11)$$

と表されるので、これを式 (10) に代入すると、

$$v_c(t) = -B_a^t \xi(t) + \frac{q(t)}{C_a} \quad (12)$$

となる。ただし、

$$C_a \equiv \frac{C_p C_1}{C_p + C_1} \quad (13)$$

である。式 (12) を $q(t)$ について書き換えると、以下のようになる。

$$q(t) = (v_c(t) + B_a^t \xi(t)) C_a \quad (14)$$

これを式 (9) に代入すると、

$$M_a \ddot{\xi}(t) + (K_a - C_a B_a^2) \xi(t) = B_a C_a v_c(t) + f(t) \quad (15)$$

と表される。両辺に左から M_a^{-1} を掛け、さらにモード減衰比行列 Ξ を導入すると、

$$\ddot{\xi}(t) + \Xi \dot{\xi}(t) + \Omega \xi(t) = B_1 v_c(t) + B_2 f(t) \quad (16)$$

となる。

2.3 制御則 線形システムの状態方程式は

$$\dot{z}(t) = A z(t) + B u(t) + v(t) \quad (17)$$

と表される。ここに、 $z(t)$ は状態変数、 $v(t)$ はシステム外乱行列、 $u(t)$ は制御入力である。式 (16) より、

$$A \equiv \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -\Xi \end{bmatrix}$$

$$B \equiv \begin{bmatrix} 0 & B_1 \end{bmatrix}^t$$

$$z \equiv \begin{bmatrix} \xi & \dot{\xi} \end{bmatrix}^t$$

であり、 $u(t) = [v_c(t)]$ である。

また、出力方程式は次式で表される。

$$y(t) = C z(t) + w(t) \quad (18)$$

ここに、 $y(t)$ は観測量、 w は観測ノイズ行列である。 $v_p(t)$ のみが観測できるとき、 $y(t) = [v_p(t)]$ であり、

$$C \equiv \begin{bmatrix} -B_a^t & 0 \end{bmatrix}$$

となる。

本研究では、カルマンフィルタをオブザーバーとして用いるとすると、システムの状態空間モデルは次のように表される。

$$\dot{\hat{z}}(t) = A \hat{z}(t) + B u(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)]$$

$$= [A - LC] \hat{z}(t) + B u(t) + L y(t) \quad (19)$$

ここで、 $\hat{z}$ は推定状態量、 L はカルマンゲインである。定常な確率過程において、 v と w の期待値が0、すなわち、

$$E\{v(t)\} = 0, \quad E\{w(t)\} = 0 \quad (20)$$

であるとし、共分散行列は

$$E\{v(t)v^t(\tau)\} = V \delta(t - \tau)$$

$$E\{w(t)w^t(\tau)\} = W \delta(t - \tau) \quad (21)$$

と表されるとする。このとき、式 (19) 中のカルマンゲイン L は

$$L = S C^t W^{-1} \quad (22)$$

と表される。 S はリッカチ方程式 (23) の解である。

$$A S + S A^t - S C^t W^{-1} C S + V = 0 \quad (23)$$

入力 $u(t)$ は、推定状態量 $\hat{z}$ を用いたフィードバック制御入力とする。すなわち、

$$u(t) = -K \hat{z}(t) \quad (24)$$

とする。 K は状態フィードバックゲインである。LQR 理論¹⁹⁾ では、次のような評価関数 J を最小にする状態フィードバックゲインベクトル K を用いる。

$$J = \int_0^\infty (\hat{z}^t Q \hat{z} + u^t r u) dt \quad (25)$$

ここで、 Q は状態量ベクトルに関する重み行列、 r は制御量ベクトルに関する重み行列である。このとき、 J を最小にする最適ゲインは式 (26) で与えられる。

$$K = -r^{-1} B^t P \quad (26)$$

ただし、 P はリッカチ方程式 (27) の解である。

$$A^t P + P A - P B r^{-1} B^t P + Q = 0 \quad (27)$$

第 3 図 強制振動の制振シミュレーション結果：変位

第 5 図 自由減衰振動の制振シミュレーション結果：変位

第 4 図 強制振動の制振シミュレーション結果：制御電圧

第 6 図 自由減衰振動の制振シミュレーション結果：制御電圧

3. 片持ち梁の制振シミュレーション

前節で述べた理論を用いて、梁の強制振動の制振シミュレーション及び、自由減衰振動の制振シミュレーションを行った。簡単のため、梁の 1 次モードのみを考慮した。シミュレーションに用いた数値パラメータを第 1 表に示す。なお、これらの数値パラメータは、5 節で述べる実験条件と同様のものである。減衰比 ζ の値は 0.003 とし、重み行列は、 $Q = \text{diag}[1, 0]$ 、 $r = \text{diag}[10^{-11}]$ とした。システム外乱共分散行列 V 及び観測外乱共分散行列 W は、それぞれ $\text{diag}[0, 10^{-11}]$ と $\text{diag}[10^{-4}]$ とした。ただし、ブリッジ回路の平衡条件は厳密に満たされているものと仮定した。

第 1 表 シミュレーションに用いた数値パラメータ

L_b	320 mm	ρ_b	2.7×10^{-6} kg/mm ³
d_b	19.5 mm	E_b	6.9 GPa
h_b	3 mm	ρ_p	8.1×10^{-6} kg/mm ³
L_p	30 mm	E_p	66 GPa
d_p	20 mm	b_p	-2.87×10^8 N/C
h_p	0.5 mm	x_1	5 mm
		x_2	35 mm

3.1 強制振動の制振シミュレーション 梁の固有振動数 (26.33 Hz) の加振力を加え、振幅が定常状態に達した後に、振動制御を開始した。このとき、梁の変位と制御電圧のシミュレーション結果を第 3 図、第 4 図に示す。第 3 図から、制振後は定常振幅を約 90 % 抑制できていることがわかる。また、第 4 図から、制御電圧の最大値は制御開始直後の約 28V であり、その後、定常状態に遷移するとともに減少し、約 3 V に落ち着くことがわかる。

3.2 自由減衰振動の制振シミュレーション 梁の自由減衰振動に対して、制振シミュレーションを行った。制御の有無による梁の自由減衰振動の変位を比較したグラフを第 5 図に示す。また、制御電圧を第 6 図に示す。第 5 図から、制御ありの場合には、制御なしの場合に比べ、振動が明らかに早く減衰していることがわかる。また、第 6 図から、制御電圧の最大値は約 20V であることがわかる。

4. mbed

本研究では、アクティブ制御のプロセッサとして、“mbed”を用いる。“mbed”は第 7 図に示すような、DIP 40 pin の ARM 社製マイコンモジュールである²⁰⁾。動作周波数は 96 MHz で、512 KB の Flash メモリ、64 KB の SRAM、USB、Ethernet などの接続機能も備えている。

“mbed”の大きな特徴は、プログラム組込開発環境の構築が非常に容易であるという点である。コンパイラなどの開発ツールは、インターネット上のサーバに揃っており、プログラムは C 言語によって組み込むことができる。Web 上には豊富なライブラリ群が揃っており、例えば SD カードとの通信機能もライブラリを利用することで容易に実装できる。なお、“mbed”にはまだ宇宙環境下における利用実績はないが、現在大阪府立大学が開発を進めている 10cm 級超小型衛星 OPUSAT (2014 年打ち上げ予定) に搭載され、宇宙実証される予定である。

“mbed”は AD/DA 変換が可能であるが、入出力電圧範囲が 0 ~ 3.3 V であるので、正負の制御電圧が必要となる振動制御に用いるために、本研究では第 8 図に示す電圧変換回路などから構成されるインターフェース回路を実装した。第 1 図のブリッジ回路もこの中に含まれている。“mbed”

第7図 “mbed” 外観

第8図 プリント基板

第9図 制御信号のブロック線図

を用いた振動制御における制御信号のブロック線図を第9図に示す。

また、内蔵 RAM の容量は 64 kB しかないため、制御データは SPI 通信により SD カードに保存するようにした。その際、データ書き込みによるタイムロスが振動制御に悪影響を及ぼすことがないように注意が必要である。一般に、SD カードにデータを書き込む場合、256 B 単位で書きこむこととなる。256 B に満たない分は、無意味なデータが挿入される。また、書き込みの際には、ネゴシエーションが必要となるため、書き込む回数が多いほどタイムロスが大きくなる。したがって、256 B のデータが集まってから書き込みを実行することが、最も効率的な書き込み方法である。振動制御では高度な演算とデジタル・アナログ変換が必要となるため、上記のようなプログラムへの配慮も重要となる。

5. 片持ち梁のセルフセンシング制振実験

第10図に示す片持ち梁に対して、強制振動及び自由減衰振動の制振実験を行った。実験系のブロック線図を第11図に示す。実験に用いた梁と圧電素子の諸元は、第1表と同様である。片持ち梁の固定端付近の両面にはエポキシ系接着剤により圧電素子（富士セラミックス製 C-90H）が貼付されている。表側の圧電素子は加振用アクチュエータであり、アンプを介して電圧発生器と接続されている。裏側の圧電素子は制振用のセルフセンシングアクチュエータであり、プリント基板（第8図）上に実装したブリッジ回路（第1図）に接続されている。

また、レーザー変位計（オムロン社製、ZX2-LD100）を用いて、梁の先端付近（ $x=278$ mm）の変位を計測した。この変位計は計測用であり、振動制御には用いない。変位計の信号は、データロガーにより記録される。

5.1 強制振動の制振実験 加振用の圧電素子に梁の固有振動数（26.33 Hz）の正弦波電圧（3.5 V）を印加することで梁を加振し、振幅が定常状態に達した後に振動制御を開始した。強制振動の制振実験結果の変位のグラフを第12図に、制御電圧のグラフを第13図に示す。また、変位の実測値と推定値を比較したグラフを第14図に示す。

第12図から、制振後は定常振幅を約 80 % 抑制できていることがわかる。また、第13図から、制御電圧の最大値は約 28V であることがわかる。さらに、第14図から、梁の変位の推定値が実測値に収束していることがわかる。すなわち、圧電素子のセンサ電圧のみから、カルマンフィルタにより梁の状態量を推定し、強制振動を抑制することができることが確認された。

第10図 制振対象の片持ち梁

5.2 自由減衰振動の制振実験 加振用の圧電素子に梁の固有振動数（26.33 Hz）の正弦波電圧を印加することで梁を加振し、振幅が定常状態に達した後に加振を停止し、自由減衰振動の振動制御を開始した。また、同様の方法で制御なしの場合の自由減衰振動実験も行った。制御の有無による梁の自由減衰振動の変位を比較したグラフを第15図に

第11図 振動制御実験のブロック線図

第12図 強制振動の制振実験結果：変位

第13図 強制振動の制振実験結果：制御電圧

第14図 強制振動時の変位の実測値と推定値の比較

のため、第17図に示した通り、1次モードが支配的でなくなると、状態量推定がうまくいかず、観測スピルオーバーが生じたと考えられる。また、ブリッジ回路の平衡条件が厳密に満たされていないため、センサ情報に外乱が加わっていることも原因と考えられる。

第15図 自由減衰振動の制振実験結果：変位

第16図 自由減衰振動の制振実験結果：制御電圧

第17図 自由減衰振動時の変位の実測値と推定値の比較

示す。このときの制御電圧の結果を第16図に示す。また、変位の実測値と推定値を比較したグラフを第17図に示す。

第15図から、制御ありの場合には、制御なしの場合に比べ明らかに早く振動が減衰していることがわかる。しかし、制御ありの自由減衰振動の時刻歴を見ると、1次の振動が減衰した後も、減衰しきっていない高周波の振動が見られる。また、第16図では、一度小さくなった制御信号が再び増加している。これは、シミュレーションには見られなかった現象である。本実験で採用したカルマンフィルタでは、制御モデルに梁の1次モードしか考慮していない。そ

6. 結 言

本稿では、汎用マイコンモジュール“mbed”と圧電素子を用いた片持ち梁のセルフセンシング振動制御について述べた。“mbed”の利用に当たり、電圧変換回路などから構成されるインターフェース回路を開発することで、“mbed”に振動制御の機能を付加することに成功した。また、圧電素子をブリッジ回路に接続してセルフセンシングを行い、得られたセンサ電圧のみからカルマンフィルタを用いて梁の

状態量を推定することで，外部センサを用いることなく振動制御を行うことに成功した．

本研究が提案する振動制御デバイスは，従来のセルフセンシング振動制御とは異なり，パソコンやAD・DA変換器などをはじめとする複雑な地上支援設備を必要とせず，ひとつの振動制御ユニットとして自己完結している．本研究は，スマート構造をシステムとして扱い，宇宙における実利用を見据えた研究である．本手法及びデバイスを用いることで，振動制御システムを大幅に小型・軽量化することが可能となる．今後は，この制振モジュールをさらに小型・高性能化し，超高精度スマート構造システムへの適用を目指していく．

参 考 文 献

- 1) Baz, J. and Poh, S.: Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators, *Journal of Sound and Vibration*, **126**, 2(1988), pp. 327-343.
- 2) Rawley, E. F. and de Luis, J.: Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures, *AIAA Journal*, **25**, 10(1987), pp. 1373-1385.
- 3) Dosch, J. J. and Inman, D. J.: A Self-sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **3**, 1(1992), pp. 166-185.
- 4) Anderson, E. H. and Hagood, N. W.: Simultaneous Piezoelectric Sensing/Actuation: Analysis and Application to Controlled Structures, *Journal of Sound and Vibration*, **174**, 5(1994), pp. 617-639.
- 5) Takigami, T., Oshima, K. and Hayakawa, Y.: Tracking Control of a Cantilever Beam using Self-Sensing Actuator based on Virtual Bridge Circuit, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **64**, 624(1998), pp. 2931-2938.
- 6) Forward, R. L.: Electronic Damping of Vibrations in Optical Structures, *Applied Optics*, **18**, 5(1979), pp. 690-697.
- 7) Hagood, N. W. and von Flotow, A.: Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks, *Journal of Sound and Vibration*, **146**, 2(1991), pp. 243-268.
- 8) Wu, S. Y.: Piezoelectric Shunts with Parallel R-L Circuit for Smart Structural Damping and Vibration Control, in *Proc. SPIE Symp. Smart Structures Materials Passive Damping Isolation*, (1996), pp. 259-269.
- 9) Hollkamp, J. J.: Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **5**, 1(1994), pp. 49-57.
- 10) Richard, C., Guyomar, D., Audigier, D. and Bassaler, H.: Enhanced Semi Passive Damping using Continuous Switching of a Piezoelectric Device on an Inductor, in *Proc. SPIE Smart Structures and Materials Damping and Isolation*, **3989**(2000), pp. 288-299.
- 11) Clark, W. W.: Vibration Control with State-Switched Piezoelectric Materials, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **11**, 4(2000), pp. 263-271.
- 12) Richard, C., Guyomar, D., Audigier, D. and Ching, G.: Semi-passive Damping using Continuous Switching of a Piezoelectric Device, *Proc. SPIE Smart Structures Materials Passive Damping Isolation*, **3672**(1999), pp. 104-111.
- 13) Corr, L. R. and Clark, W. W.: Comparison of Low-frequency Piezoceramic Shunt Techniques for Structural Damping, *Proc. SPIE Smart Structures and Materials Damping and Isolation*, **4331**(2001), pp. 262-272.
- 14) Onoda, J., Makiyara, K. and Minesugi, K.: Energy-recycling Semi-active Method for Vibration Suppression with Piezoelectric Transducers, *AIAA Journal*, **41**, 4(2002), pp. 711-719.
- 15) Makiyara, K., Onoda, J. and Minesugi, K.: A self-sensing Method for Switching Vibration Suppression with a Piezoelectric Actuator, *Smart Materials and Structures*, **16**, 2(2007), pp. 455-461.
- 16) Niederberger, D. and Morari, M.: An Autonomous Shunt Circuit for Vibration Damping, *Smart Materials and Structures*, **15**, 2(2006), pp. 359-364.
- 17) Takeuchi, S., Makiyara, K. and Onoda, J.: Reliable and Evolvable Vibration Suppression by Self-powered Digital Vibration Control, *Journal of Vibration and Acoustics*, **134**, 024502(2012).
- 18) Makiyara, K., Takeuchi, S., Shimose, S. and Onoda, J.: Innovative Digital Self-powered Autonomous System for Multimodal Vibration Suppression, *AIAA Journal*, **50**, 9(2012), pp. 2004-2011.
- 19) Kwakernaak, H. and Sivan, R.: *Linear Optimal Control System*, Wiley, New York, 1972, pp. 220-222.
- 20) mbed: <http://mbed.org/> (accessed 10 Sep. 2012).

A.1 行列の定義

$$\Omega \equiv M_a^{-1} (K_a - B_a C_a B_a), \quad (\text{A1})$$

$$B_1 \equiv M_a^{-1} B_a C_a, \quad B_2 \equiv M_a^{-1}, \quad (\text{A2})$$

$$M_a \equiv M_b + M_p, \quad K_a \equiv K_b + K_p, \quad (\text{A3})$$

$$\Xi \equiv 2\zeta \text{diag}[\omega_k], \quad (\text{A4})$$

$$M_b \equiv \text{diag} \left[\rho_b A_b \int_0^{L_b} \Phi_k \Phi_k dx \right], \quad (\text{A5})$$

$$K_b \equiv \text{diag} \left[E_b I_b \int_0^{L_b} \frac{d^2 \Phi_k}{dx^2} \frac{d^2 \Phi_k}{dx^2} dx \right], \quad (\text{A6})$$

$$M_p[k, l] \equiv \rho_p A_p \int_{x_1}^{x_2} \Phi_k \Phi_l dx, \quad (\text{A7})$$

$$K_p[k, l] \equiv E_b I_b \int_{x_1}^{x_2} \frac{d^2 \Phi_k}{dx^2} \frac{d^2 \Phi_l}{dx^2} dx, \quad (\text{A8})$$

$$B_a[k] \equiv -\frac{b_p J_p}{d_p (x_2 - x_1)} \int_{x_1}^{x_2} \frac{d^2 \Phi_k}{dx^2} dx, \quad (\text{A9})$$

$$\xi(t)[k] \equiv \xi_k(t), \quad (\text{A10})$$

$$f(t)[k] \equiv \int_0^{L_b} f(x, t) \Phi_k(x) dx \quad (\text{A11})$$

A.2 Nomenclature

A	:	断面積
b_p	:	圧電素子の電気機械結合係数
C_p	:	圧電素子の静電容量
d	:	幅
D_z	:	圧電素子の電位
E	:	ヤング率
f	:	外力
$H(x_2 - x_1)$	:	ヘヴィサイドの階段関数
h	:	厚さ
I	:	断面 2 次モーメント
J_p	:	圧電素子の断面 1 次モーメント
L	:	長さ
n	:	計算するモード数
q	:	圧電素子の電荷
v_c	:	制御電圧
v_p	:	圧電素子の発生電圧
w	:	梁のたわみ
x	:	梁の長さ方向の座標
x_1, x_2	:	圧電素子の端点位置
$\delta(x)$	:	デルタ関数
ζ	:	減衰比
ξ	:	梁のモード変位
ρ	:	密度
Φ	:	梁のモード関数
ω	:	固有円振動数
Subscripts		
b	:	梁に関する量
p	:	圧電素子に関する量