B22 パラメータ変動モデルを利用したスマートボード の故障状態モニタリング

Fault Condition Monitoring of Smart Board Using Linear Parameter Varying Model

正 奥川 雅之 (岐阜高専)

Masayuki OKUGAWA Gifu National College of Technology, Motosu, Gifu, 501-0495

This paper describes a modeling of a smart board composed four piezoelectric materials due to monitor and detect the fault of the system using health monitoring technique. For example, the damage of piezoelectric materials and the breaking wire. A model of the smart board with the fault is expressed by a linear parameter varying system. The output signal of the object system is affected by damage of piezoelectric materials and breaking wire. Subspace state space identification is adopted in order to detect the fault in this paper. Numerical and experimental results indicates that the fault detection can be achieved by using proposed method.

Key Words : Fault Diagnosis and Detection, Model-based Health Monitoring, Piezoelectric Material, Linear Parameter Varying System, System Identification, Supervisor System

1. はじめに

本研究は、複数枚の圧電素子が分散的に貼付されたスマートボードに対して、セルフセンシングアクチュエーション機能を利用したヘルスマニタリング手法の検討を目的とする。ヘルスマニタリングとは、1990年 Gerardi によって提案された構造物自身による健全性評価技術であり、スマート材料・構造物の応用分野の一つである⁽¹⁾。機械構造システムの故障や異常診断に関する研究の多くは、光ファイバなどのセンサを機械構造物に設置あるいは複合し、そのセンサ信号を解析することにより異常や故障を検知する方式が主流である。これをセンサベースヘルスマニタリングと呼ぶ。一方、予想される異常や故障状態をモデル化することにより規範モデルを定義し、システム同定を利用した方法や、規範モデルをもとに設計されたオブザーバによる推定値と実測値とを比較する方法がある。このような方法をモデルベースヘルスマニタリングと呼んでいる⁽²⁾。本研究では後者の立場をとるものとする。モデルベースヘルスマニタリングの利点は、既に構成されている制御系のセンサやアクチュエータをそのまま利用することによって、冗長なセンサやアクチュエータを配置する必要がない点である。

これまで、片持ち梁を対象に外乱等によって生じる弾性振動の抑制を目的とし、圧電素子を利用したスマート化を検討してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。特に、セルフセンシングアクチュエーション問題を中心にその実現方法および問題点に関する考察等を行ってきた。また、温度に依存する圧電素子の静電容量変動によって生じる制御入力や観測出力信号のゲイン変動は、制御性能の劣化をもたらすため、ゲインスケジューリング制御を適用し、その劣化改善を試みる自己調整手法を提案した⁽⁵⁾。圧電素子に関する配線の断線問題も圧電素子の静電容量変動と同様に扱うことができる。

本論文では、圧電素子を複数貼付したスマートボードに対して、パラメータ変動モデルを適用したヘルスマニタリングについて検討する。スマートボードのシステムダイナミクスと各故障（圧電素子の破損や断線）の状態に対する特性変化

を整理することによって、そのシステム構造がアフィン形式のパラメータ変動モデルとして記述できることがわかっている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。そこで、モデルベースヘルスマニタリングに基づく故障検知手法について紹介し、検討を行う。規範モデルとシステム同定を利用した手法と複数オブザーバによるスーパーバイザ手法の両手法について、その有効性を数値シミュレーションおよび実装実験により検証する。

2. 問題設定

図1に示すような圧電素子が貼付された片持ち梁をスマートボードと呼び、故障検知対象とする。ステンレス板(長さ102[mm], 幅15[mm], 厚さ0.5[mm])の片側に圧電素子(長さ40[mm], 幅15[mm], 厚さ0.5[mm])を2枚、合計4枚貼付し、それぞれパラレル結線されている。圧電素子を貼付することによってセルフセンシングアクチュエーション機能を有することから、多くの研究者によって知的な片持ち梁としてその応用例が模索されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

Fig. 1 Smart board

本論文では、圧電素子の破損・断線を故障と定義する。断線枚数 n は断線してない使用可能な圧電素子の枚数であり、断線パターン p は断線枚数時の使用可能な圧電素子の組み合わせである。図2は、断線枚数 $n = 2$ の場合に対する断線パターンを示す。図中において、使用可能な圧電素子を黒、

断線によって使用不可能な圧電素子を白で示した。断線枚数 $n=2$ における断線パターン p はそれぞれ次のように定義しておく。 $p=0$ は、梁の根元部分側の圧電素子 2 枚が使用可能な状態、 $p=1$ は梁の片側 2 枚の圧電素子を使用可能な状態、 $p=2$ は梁の先端部分側の圧電素子 2 枚が使用可能な状態である。

Fig. 2 Breaking wire pattern of the smart board with piezoelectric materials

何らかの要因で生じた圧電素子に関する断線が二カ所存在するものと想定し、その状態 (断線枚数と断線パターン) を検知することを考え、セルフセンシングアクチュエーション機能を利用したヘルスマニタリングを検討する。

3. スマートボードのダイナミクスと状態空間モデル

3.1. 運動方程式 スマートボードの運動方程式は、一様に圧電素子が貼付されていると仮定した場合、次式で与えられる。

$$\sum_{i=1}^{\infty} EI(1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = N \bar{v}(t) \{ \delta'(x) - \delta'(x-l) \} \quad (1)$$

ただし、 $\delta(x)$ は Dirac のデルタ関数である。 I は断面 2 次モーメントで、 ρ は梁の単位単位体積当たりの質量、 A は梁の断面積、 N はアクチュエータ係数である。さらに、運動方程式 (1) を一般解

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x) f_i(t) \quad (2)$$

を用いてモード展開すると、次の i 次振動モードに関する運動方程式 (3) 式を得る。ただし、 ω_i は各振動モードに対する固有角振動数である。

$$\frac{d^2 f_i(t)}{dt^2} + \gamma \omega_i^2 \frac{df_i(t)}{dt} + \omega_i^2 f_i(t) = \frac{N}{\rho A} \frac{dX_i(l)}{dx} \bar{v}(t) \quad (3)$$

$f_i(t)$ はモード座標であり、梁の弾性振動はこれら各振動モード変位の総和として表される。

3.2. センサ方程式 スマートボードは電界 E を印加することで曲げ応力が発生する。また、その変形に対するセン

サ電圧 v_p を得る。圧電素子の静電容量を C_p とすると、次式で表される。

$$v_p(t) = \frac{q_p(t)}{C_p} = \Phi_1 \sum_{i=1}^{\infty} X'_i(l) f_i(t) + \Phi_2 \bar{v}(t) \quad (4)$$

ここで、 C_p は圧電素子の静電容量の総和、 C_f はチャージアンプ内コンデンサの静電容量、 $X'_i(l)$ はモード関数の空間微分である。また、 $\Phi_1 = b d_{31} \omega_p E / C_p$ 、 $\Phi_2 = b \epsilon_{33}^T l / (C_p t_p)$ である。ただし、 E はスマートボードのヤング率、 w_p は梁の中立軸から圧電素子の中心軸までの距離である。 ϵ_{33}^T は応力を一定にした場合の誘電率、 b は梁の幅、 d_{31} は圧電ひずみ定数である。

Fig. 3 Instrumentation circuit

制御入力 v_c とすると、図 3 に示すチャージアンプを計測回路として用いた場合、観測出力 v_s は次式で与えられ、センサ方程式 (5) を得る。

$$v_s(t) = \bar{C} \Phi_1 \sum_{i=1}^{\infty} X'_i(l) f_i(t) + \bar{C} v_c(t) \quad (5)$$

ただし、 $\bar{C} = C_p / C_f$ 、 $v_c(t) = \bar{v}(t) / \epsilon$ の関係にあり、 ϵ は入力電圧 v_c に対する分圧比である。

3.3. 状態空間表現 状態変数として $x_s(t)$ を次のようにおく。

$$x_s(t) \triangleq [x_1^T(t) \cdots x_i^T(t) \cdots x_{\infty}^T(t)]^T \quad (6)$$

$$x_i(t) \triangleq [f_i(t) \quad \dot{f}_i(t)] \quad (7)$$

このとき、振動モードに関する運動方程式 (3) とセンサ方程式 (5) より、 $u(t) = v_c(t)$ 、 $y(t) = v_s(t)$ とすると、 i 次振動モードに関する状態空間表現を次のように表すことができる。

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + b_i u(t) \quad (8)$$

$$y_i(t) = c_i x_i(t) + d_i u(t) \quad (9)$$

このとき、

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -\gamma \omega_i^2 \end{bmatrix}, \quad b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\epsilon N}{\rho A} X'_i(l) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$c_i = [\bar{C} \Phi_1 X'_i(l) \quad 0], \quad d_i = \bar{C} \quad (11)$$

となる。以上より、スマートボードのダイナミクスは線形時不変 (LTI: Linear Time Invariant) システムとして記述でき

る。直達項ゲイン d_i は、 C_p の変動を陽に表していることがわかる。また、式 (3) の右辺および式 (5) の右辺第一項の係数にも C_p および圧電素子の面積に関する値を含むため、制御行列、観測行列、直達項ゲインに影響を与える。この影響は、システムを不安定化させたり、制御入力飽和や減衰率の低下を引き起こす原因となることがわかっている。本論文では、2次振動モードまで考慮するものとする。

4. 故障状態に対するパラメータ変動モデル

本論文で想定するスマートボードでの故障状態において圧電素子の静電容量が影響する。その結果、先に述べたように各係数行列成分が変動する。そのシステム構造変化は、次のようなパラメータ変動 (LPV: Linear Parameter Varying) モデル

$$\dot{x}_s(t) = A(\theta)x_s(t) + b(\theta)u(t) \quad (12)$$

$$y(t) = c(\theta)x_s(t) + d(\theta)u(t) \quad (13)$$

として表現することが可能である。健全時においては、先に示したような LTI システムとみなされるが、変動モデルとみなすことによって故障状態を包含したモデリングが可能となる。さらに、圧電素子の静電容量変化と断線枚数および断線パターンが線形関係にあることから、式 (12), (13) の各係数行列 (A , b , c) は、圧電素子の断線枚数変数を θ_1 、断線パターン変数を θ_2 と定義し、故障パラメータ $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ によって、式 (14) から (16) に示すようにアフィン形式として整理することができる。

$$A(\theta) = A_0 + A_1\theta_1 + A_2\theta_2 \quad (14)$$

$$b(\theta) = b_0 + b_1\theta_1 + b_2\theta_2 \quad (15)$$

$$c(\theta) = c_0 + c_1\theta_1 + c_2\theta_2 \quad (16)$$

実際に、100 回の同定実験を行い、断線枚数変数 θ_1 、断線枚数が二枚時による断線パターン変数 θ_2 について整理すると、状態空間モデルの各係数行列成分は、図 4, 5 に示すようになる。それぞれの図中のプロットは、100 回の同定実験の平均であり、実線は各故障状態で得られた同定結果に対する近似直線である。ただし、システム構造は、モデル形式に統一してある。

5. 配線断線に対するヘルスマモニタリング

5.1. 規範モデルによるパラメータマッチング手法 前述したようにスマートボードは圧電素子の静電容量および面積の変動に対して、アフィン形式の LPV モデルとして記述されるため、これを規範モデルとする。したがって、システム同定を導入し、各状態での同定モデルを獲得することができれば、規範モデルと同定モデルを比較することにより、故障パラメータ θ を同定できる。そこで、同定モデルの各係数行列を $\tilde{A}$, $\tilde{b}$, $\tilde{c}$ とすると、式 (14) から (16) より、

$$\tilde{A} = A_0 + A_1\theta_1 + A_2\theta_2 \quad (17)$$

$$\tilde{b} = b_0 + b_1\theta_1 + b_2\theta_2 \quad (18)$$

$$\tilde{c} = c_0 + c_1\theta_1 + c_2\theta_2 \quad (19)$$

Fig. 4 Model parameters for θ_1

Fig. 5 Model parameters for θ_2

の関係が得られる。 θ_1 は、同定モデルの直達項成分として同定される。したがって、式 (17) から (19) において θ_2 について解くことにより、 θ_2 が同定され、故障状態が特定される。今回は、システム同定として部分空間同定法を用いた⁽¹⁰⁾。規範モデルによるパラメータマッチング手法を用いた故障検知は次のような手順で行われる。

- 検知対象に入力信号を印加する。検知対象より観測出力信号が得られる。
- 観測出力信号と入力信号より部分空間同定法を適用し、状態空間モデルを同定する。このとき、断線枚数変数 θ_1 が直達項ゲインとして陽に現れ、断線枚数の検知が可能となる。得られた同定モデルをモデル形式に変換し低次元化する。
- 規範モデルの各行列成分に対して、断線パターン変数 θ_2 について整理することにより断線パターン p が同定され、故障状態の検知が可能となる。

5.2. 複数オブザーバによるスーパーバイザ手法 複数のオブザーバ (状態観測器) を用いたスーパーバイザ * (Supervisor) 手法による故障検知を考える。LPV モデルをもとに各故障状態に対する状態観測器 $\mathcal{O}(n, p)$ を設計する。状態観測器 $\mathcal{O}(n, p)$ は式 (20) の同一次元オブザーバを用いる。 i をサンプル数, $n = 2$ とした場合, 次のように定義される。

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A(2, p)\hat{x}(t) + b(2, p)u(t) \\ &\quad + G_{np}(2, p)[y(t) - \hat{y}_{np}(t)] \\ \hat{y}_{np}(t) &= c(2, p)\hat{x}(t) + d(2, p)u(t) \\ (p &= 0, 1, 2)\end{aligned}\quad (20)$$

ここで,

$$A_{ob}(n, p) = A(n, p) - G_{np}c_{ob}(n, p) \quad (21)$$

$$b_{ob}(n, p) = [b(n, p) \quad G_{np}] \quad (22)$$

$$c_{ob}(n, p) = c(n, p) \quad (23)$$

とおくと,

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_{ob}(n, p)\hat{x} + b_{ob}(n, p)[u \quad y]^T \quad (24)$$

$$\hat{y}_{np}(t) = c_{ob}(n, p)\hat{x} \quad (25)$$

となる。

制御入力信号 $u[i]$ および観測出力信号 $y[i]$ を状態観測器 $\mathcal{O}(n, p)$ の入力とすれば, 推定出力信号 $\hat{y}[i]$ が得られる。そこで, 制御入力信号 $u[i]$ および推定出力信号 $\hat{y}[i]$ を用いてシステム同定を行う。得られる状態空間モデルをモデル形式に変換して低次元化を行う。これより求められた制御行列と観測行列を, それぞれ $\overline{b}_{ob}(n, p)$ および $\overline{c}_{ob}(n, p)$ とおく。各観測行列と制御行列の差をそれぞれ,

$$e_c(n, p) = c_{ob}(n, p) - \overline{c}_{ob}(n, p) \quad (26)$$

$$e_b(n, p) = b_{ob}(n, p) - \overline{b}_{ob}(n, p) \quad (27)$$

とし, その積を δ とする。

$$\delta(n, p) = e_c(n, p)e_b(n, p) \quad (28)$$

このとき, $\delta(n, p)$ が最小値となるオブザーバ $\mathcal{O}(n', p')$ がそのときの故障状態 (n', p') を示すものである。

$$\mathcal{O}_{Fault} = \{\mathcal{O}(n', p') | \min_{n, p} \delta(n, p)\} \quad (29)$$

複数オブザーバによるスーパーバイザ手法を用いた故障検知は次のような手順で行われる。

- 検知対象に入力信号を印加する。検知対象より観測出力信号を得る。
- 故障システムの入出力データより部分空間同定法を適用し, 状態空間モデルを同定する。断線枚数変数 θ_1 が直達項ゲインとして同定される。得られた同定モデルをモデル形式に変換し低次元化する。

- 各故障状態のオブザーバに対して入力信号 u と出力信号 y を印加し, 推定出力信号 $\hat{y}$ を得る。入力信号 u と推定出力信号 $\hat{y}$ から, システム同定を行う。得られた同定モデルをモデル形式に変換し低次元化する。
- 各観測行列と制御行列の差の積が最小値を有するオブザーバを故障状態のオブザーバとする。

図 6 は, 複数オブザーバによるスーパーバイザ手法を用いた故障検知の概念図である。

Fig. 6 Concept of supervisor by using multiple observers

6. 数値シミュレーションおよび実装実験結果

6.1. 規範モデルによるパラメータマッチング手法 表 1 に規範モデルによるパラメータマッチング手法を適用した場合の数値シミュレーションおよび実装実験結果を示す。

Table 1 Simulation and experimental result of parameters matching method using LPV model

(n, p)	(1, 0)	(1, 1)	
θ_2	0	1	
$\hat{\theta}_2(\text{Sim.})$	0.2778	17.8072	
$\hat{\theta}_2(\text{Exp.})$	5.8596	7.0599	
(n, p)	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)
θ_2	0	1	2
$\hat{\theta}_2(\text{Sim.})$	0.1454	0.9970	8.6050
$\hat{\theta}_2(\text{Exp.})$	115.4961	8.5699	270.6823
(n, p)	(3, 0)	(3, 1)	
θ_2	0	1	
$\hat{\theta}_2(\text{Sim.})$	0.0574	1.0194	
$\hat{\theta}_2(\text{Exp.})$	5.8421	1.3078	

圧電素子の断線枚数が少なく, かつ圧電素子が梁の固定端側に配線されている状態ほど断線パターン変数 θ_2 の故障検知に対する精度は良い。断線枚数および断線パターンがそれぞれ $(n, p) = (1, 1)$ および $(n, p) = (2, 2)$ の場合, 断線パターン変数の検知精度が劣化していることが確認できる。また, $n = 2$ の時よりも, $n = 1$ の時の方が検知精度が悪い。これらの状態では, 断線パターン変数 θ_2 の同定が困難である。原因としては, 信号出力レベルが小さいために S/N 比が悪く, か

* 語源は, 監督者や管理者の意

つ、雑音成分の影響が他の故障状態より受けやすいため、雑音成分の混在によって同定精度に影響を与えることが考えられる。その他の故障状態では、同じ断線枚数の故障状態において、断線パターン変数は、互いに干渉しない領域で同定されることが考えられるため、故障状態の検知には問題ないと考えられる。実装実験では、ほとんどの状態に対して故障検知が困難であることが確認できる。原因として、振動モードとセンサ出力信号の影響が考えられる。梁の固定端付近では一次振動モード、二次振動モードのどちらも歪みが大きく、固定端側を圧電素子で励振させればどちらの振動モードも励振かつ検出できる。しかし、自由端側においては、一次振動モードに対しては、歪みがほとんど発生しないため励振および検出ができないものと考えられる。

6.2. 複数オブザーバによるスーパーバイザ手法 図7から9に複数オブザーバによるスーパーバイザ手法を適用した場合の数値シミュレーションおよび実装実験結果を示す。健全時と同程度の推定誤差になるように、各オブザーバゲインを調整した。各グラフの値は、各状態における観測出力と各オブザーバによる推定値との推定誤差である。五回の数値シミュレーションを行い平均したものである。入力信号には、M系列信号を検知対象に入力し、観測出力信号には雑音成分を混在させた。

Fig. 7 Simulation and experimental results of supervisor using multiple observer $(n, p) = (1, p)$

数値シミュレーションおよび実装実験結果ともに、良好な結果が得られている。実装実験では、各 δ の差が顕著にみられるため、どの故障状態に対しても有効に故障状態の検知が可能であるといえる。

Fig. 8 Simulation and experimental results of supervisor using multiple observer $(n, p) = (2, p)$

7. 結言

本論文では、圧電素子の配線の断線に対する故障、特に断線枚数と断線パターンの検知を目的とし、規範モデルを用いたパラメータマッチング手法と複数オブザーバによるスーパーバイザ手法に関する数値シミュレーションおよび実装実験を行った。規範モデルを用いたパラメータマッチング手法では、故障状態を特定することが困難であった。一方、複数オブザーバによるスーパーバイザ手法を適用することにより、検知状態の検知が可能であることを確認した。

今後の検討課題として、故障状態を包含する LPV モデルを用いて、同じシステム構造を有する LPV オブザーバを設計する方法の確立が挙げられる。

参考文献

- (1) Gerardi, T. G., "Health Monitoring Aircraft," J. Intell. Mater. Syst. and Struct. Vol. 10, No. 3, pp. 375-385, (1990).
- (2) Simani, S., C. Fantuzzi and R. J. Patton, "Model-Based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques," Springer, (2003).

(a) $(n, p) = (3, 0)$, Sim. (b) $(n, p) = (3, 1)$, Sim.) (c) $(n, p) = (3, 0)$, Exp. (d) $(n, p) = (3, 1)$, Exp.

Fig. 9 Simulation and experimental results of supervisor using multiple observer $(n, p) = (3, p)$

- (3) 奥川雅之, 堀康郎, 「圧電素子を用いたスマート柔軟片持ち梁の自己調整問題」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 660, pp. 858-865, (2003).
- (4) Okugawa, M. and M. Sasaki, "System Identification and Controller Design of a Self-Sensing Piezoelectric Cantilever Structure," J. Intell. Mater. Syst. and Struct., Vol. 13, No. 4, pp. 241-252, (2002).
- (5) 前田裕司, 奥川雅之, 「ゲインスケジューリングによるスマート柔軟構造物の自己調整」, SI2003 講演論文集, Vol. I, pp. 347-348, (2002).
- (6) 奥川雅之, 田口敏紀, 堀康郎, 「スマート片持ち梁を利用した無重力空間における質量測定法の検討」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 94-99, (2003).
- (7) 奥川雅之, 江川幸一, 「圧電素子を用いたスマートワッシャによるボルト緩み検知法の検討」, 非破壊検査, Vol. 52, No. 9, pp. 511-516, (2003).
- (8) 宮田剛, 奥川雅之, 「故障を想定したスマート柔軟梁におけるモデリングの検討」, 第 47 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 529-530, (2003).
- (9) 宮田剛, 奥川雅之, 「パラメータ変動モデルを利用したスマート柔軟梁におけるヘルスマニタリング」, 第 8 回「運動と振動の制御」, シンポジウム講演論文集, pp. 121-124, (2003).
- (10) Overschee, P. Van and P. De Moor, "Subspace Identification for Linear System," Kluwer Academic Pub., (1996).