1332 統計的検定手法を用いた既存構造物の無学習損傷診断手法

Unsupervised damage diagnostic method for existing structure using statistical approach

○正 岩崎 篤 (東大) 正 轟 章 (東工大)
杉谷恒也 (電業社)

Atsushi Iwasaki, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
Akira TODOROKI, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo
Tsuneya Sugiya, DMW Corporation, 3-27, Miyoshi-chou, Mishima-shi, Shizuoka

Key words: Smart Structure, Statistical Diagnosis, Damage Detection, Health Monitoring, Response Surface, F-Statistics, Self-Learning

1. 緒言

構造ヘルスマonitoringの実機構造物への適用の際には、遠隔地からの常時状態診断を行うため、それに適した自動損傷診断手法の構築が必要不可欠となる。ことに近年では首都高速道路や鉄道橋梁などの都市インフラに関わる構造物の劣化が顕著であり、これら供用中の構造物に対して適用可能な、後付構造ヘルスマonitoringシステムに関する要求が高まってきている。そこで本研究では、この様な既存の構造物の構造ヘルスマonitoringシステムに対し後付で適用可能な損傷診断手法を提案し、その有効性の検証を行う。

2. 統計的診断手法を用いた自動構造異常診断

一般的な損傷診断手法においては、何らかの特徴量と損傷の関係性を同定し、実測により得られた同特徴量との比較により判定を行うという手続きがとられている。そのため、特徴量の変動から損傷をほぼ正確に同定することが可能であるが、実構造物のモデル化、損傷時データの取得などの多くのコストを要求する作業を必要とし、これが実用上大きな障害要因となっており、簡便な方法で、その構造物が損傷しているか否かを判定する損傷判定法が望まれている。

そこで本研究では、構造モデルや損傷状態におけるデータを用いない手法として、損傷の検知に特化し、健全状態と現状とのセンサデータの差異を統計的診断手法を用いて判定することで、構造物の損傷判定を行う手法の提案を行う。本手法では、応答曲面を用いて測定データ間の関係性のシステム同定を行い(図1)、この同定されたシステムの変動を統計的差異検定で検出することで損傷の検知を行う。この様に同定されたシステム自体を診断に用い、センサ間の空間的関係の変動を検知することで損傷の検知を行うため、パラメータの閾値判定による損傷検知では実施困難な、境界条件の変動や誤差の大きい環境下での構造物の損傷検知が可能となる。

本手法の利点をまとめると以下ようになる。

- センサを取り付けた後に初期データを取得し、そのデータからの差異判定を行うために、FEMモデルなどの構造モデルが不要であり、人間の判断を必要としない。
- センサデータ間の関係を判定に用いるため、基準データに負荷時、無負荷時の様々なデータを用いることで、外力を受ける構造物に対しても適用が可能である。
- 前述の理由により構造形状に関係なく適用が可能である。

- 基準データとして正常状態でのデータしか必要としないため既存の構造物に対し後付で適用が可能である。
- 構造物の損傷状態を後述のただひとつの確率変数 F で評価するため、損傷診断の自動化が容易である。

Fig 1. System identification using Response surface

2. 1 損傷診断手順 手順を図2に示す。まず、無損傷状態であることが確定している状態で取得した基準データからシステム同定を行い、これを基準応答曲面とする。基準応答曲面はセンサ毎に1つずつ作成する。モニタリング開始時に必要なプロセスは以上であり、以上のプロセスを学習プロセス(図2中左)とする。次にモニタリングプロセス(図2中右)に移る。学習プロセスと同様に測定データからシステム同定を行い、これを測定応答曲面とする。そしてこの二つの曲面の同等性を、 F 検定を用いて統計的に検定し、同等性が棄却された場合に損傷が発生したと診断する。

二つの応答曲面の同等性の検定を F 検定で行った場合、二つの応答曲面が同等である際に、その F 検定値の確率分布が F

Fig 2. Procedure of damage detection

Fig 3. F statistic distribution of similarity test of similar response surfaces

分布に従うことが知られている (図3). このF分布は $F(p, n-2p)$ であり, n は応答曲面の回帰データ数, p は応答曲面の自由度であることから, システム同定に用いるべく設定した応答曲面形状に固有であり, 正常状態の検定値の確率分布すなわち構造が正常である場合の検定値の取りうる値を本手法では実験や解析を用いることなく導出することが可能となり, 正常, 非正常の閾値を容易に決定可能となる. 以下に応答曲面作成, 同等性検定を用いた損傷検知法の詳細を示す.

2. 2 応答曲面法 応答曲面法とは品質工学分野におけるプロセス最適化に適用されている手法であり, 実験計画, 近似関数への回帰, プロセス最適化を含む. 応答曲面とは説明変数 x_i と被説明変数 y との関係を表す近似関数である. 一般的にその関係は次式で表される.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (1)$$

ここで, ε は誤差である. 応答曲面の関数系としては多項式近似する場合が多く, 様々な変数変換を行うことで複雑な関数に近似可能となる. 応答曲面法の利点は, 最小二乗法を用いているため近似関数の推定精度を統計的手法により評価できる点と, 説明変数の有意性検定により, 自動的な回帰モデルの最適化が可能である点, 実験計画の実施により近似精度の高い応答曲面を効率よく作成できる点にある.

2. 3 最小二乗法 簡略化のため, 2次多項式近似する場合を考える.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

ここで $x_i x_j = x_{ij}$ と置き換えることで, 式(2)は次式に線形化される.

$$y = \beta_0 + \sum_{m=1}^p \beta_m x_m \quad (3)$$

ここで $p=(n+1)(n+2)/2-1$ である. n は独立変数の数である. このように高次多項モデルは線形重回帰モデルに変換できる. 式(3)から, 最小二乗法を用いて多項式の回帰係数を推定する. k 個($k > p$)のデータ点とその評価値 $y_i (i=1 \sim k)$ が実験あるいは解析によって与えられている場合, $p+1$ 個の係数の重回帰モデルは次式で表現される.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (4)$$

ここで, 式(4)の各変数はマトリクス表示すると以下のようになる.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

であり, n は実験点数, k は未知係数の個数である. 最小二乗法からの β の推定値 b は次式となる.

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (6)$$

2. 4 応答曲面同等性検定 2つの応答曲面の同等性の検定は, 統計的比較であるF検定によって行う. F検定は2標本の平均値が未知の際に, その分散を検定することによりその同等性を検定する検定手法である.

2つの標本において誤差項 ε は互いに独立であり, 同じ分散を持つと仮定し, 以下のモデル化を行う.

$$Y_1 = X_1 \beta_1 + \varepsilon_1 \quad (7)$$

$$Y_2 = X_2 \beta_2 + \varepsilon_2$$

式(7)に示す2応答曲面の同等性検定の検定量は, 一般線形制約の仮説検定と誤差分散不偏推定量から次式に定義される.

$$F_0 = \frac{SSE_0 - SSE_{12} * \frac{n-2p}{p}}{SSE_{12}} \quad (8)$$

($p=(k+1)$:自由度 n :データ点数 SSE :残差平方和 添え字 0:全点 12:標本1・2の総和). ここで, 二つの応答曲面が同等である場合, F_0 の確率分布は応答曲面の自由度とデータ点数に依存するF分布 $F(p, n-2p)$ に従う. そのため, 有意水準に α を使用した場合, 仮定の棄却領域は回帰に用いる応答曲面の自由度, データ数, 有意水準のみによって決定される次の領域で与えられる.

$$F_0 \geq F_{\alpha, p, n-2p}^a \quad (9)$$

F_0 が F_{α}^a を越えた場合に, 両応答曲面は同等であるとした仮定が棄却され, 損傷の発生が判定される.

この様にシステム同定と, 同定システムの同等性検定を用いることで損傷の発生の診断を本手法では可能とする. 通常高い精度での診断を行うには当然多数の測定データを要求することになるが, この様な損傷診断手法を用いることで, 学習データが不要, かつ, ただ一つのパラメータで構造状態が評価可能であり, 容易なヘルスマonitoringシステムの構築が可能となる.

3. 結 言

応答曲面法によるシステム同定と同定されたシステムのF検定による統計的差異検定実施することで, 損傷時のデータなしに損傷診断を行う手法の提案を行った. その利点をまとめると以下のようになる.

(1) 入出力パラメータから現在の構造システムを近似した応答曲面を統計的診断手法であるF検定で差異判定し, システム自体の変動を統計的差異検定で検知することで, 健全状態の測定データと現在の測定データのみから構造の損傷検知が行える.

(2) ただ一つのパラメータで構造状態が評価可能であり, 容易な自動診断が可能である.

(参考文献省略)