

統計的無学習損傷診断法による既存構造の異常診断（ジェットファンへの適用）

東京大学 正会員 ○岩崎 篤
 東京工業大学 轟 章
 電業社機械製作所 杉谷 恒也
 東京大学 酒井 信介

1. 緒言

構造ヘルスマニタリング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、それに適した自動的な異常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老朽化が顕著であり、これら供用中の構造物に対して適用可能な、後付構造ヘルスマニタリング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ニタリングシステムのため、後付で適用可能な損傷・異常診断手法を提案し、道路トンネル用ジェットファンの異常診断への適用からその有効性の検証を行った。

2. 統計的診断手法を用いた自動構造異常診断

構造ヘルスマニタリングの実機構造物への適用の際には、遠隔地からの自動的な損傷・異常状態の診断を行うため、それに適した診断手法の適用が重要となる。その為本研究では、損傷・異常の検知に特化することで、正常時の測定データと、現在の測定データのみから、統計データ解析を用いて構造の損傷有無の診断を行うシステムの提案を行い、その実験的検討を行っている。本手法では、応答曲面法を用いて構造のシステム同定を行い、この同定されたシステムの変動を統計的検定手法で検出することで損傷・異常の検知を行う。本手法ではこの様に同定されたシステム自体を診断に用い、センサー間の空間的關係の変動を検知することで検知を行うため、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の損傷・異常検知が可能となる。

2.1 診断手順 手順を図1に示す。まず、健全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応答曲面を作成し、これを基準応答曲面とする。応答曲面には次式に示す2次の多項式を用いる。

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

応答曲面の回帰係数は最小二乗法から計算される。応答曲面はセンサー毎に1つずつ作成し、被説明変数 y として任意のセンサーの測定値を、説明変数 x としてその周囲のセンサーの測定値を用いる。 β は回帰係数である。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とする。次にモニタリングモードに移る。モニタリングモードでは、

学習プロセスと同様に測定データから応答曲面を作成し、これを測定応答曲面とする。そしてこの2応答曲面の同等性を、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・異常が発生したと診断する。

2.2 F検定 2つの応答曲面の同等性の検定は、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。

$$\mathbf{Y}_1 = \mathbf{X}_1 \boldsymbol{\beta}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_1, \mathbf{Y}_2 = \mathbf{X}_2 \boldsymbol{\beta}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 \quad (2)$$

$\mathbf{Y}, \mathbf{X}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\varepsilon}$ は各々説明変数、被説明変数、回帰係数、誤差行列である。検定に用いる統計検定量には

キーワード 構造ヘルスマニタリング、老朽化構造、自動損傷診断、応答曲面、遠隔計測

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学 工学系研究科 03-5841-6412

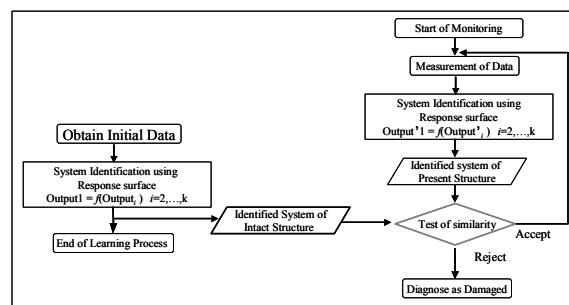


Fig.1 Flow of damage detection

$$F_0 = \frac{SSE_0 - SSE_{12} * \frac{n-2p}{p}}{SSE_{12}} \quad (3)$$

を用いる (p :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

$$F_0 \geq F_{\alpha, p, n-2p} \quad (4)$$

によって与えられる. F_0 が F_{α} 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る. 本手法では判別指標となる F_0 値が、構造が正常である場合に応答曲面のモデルのみから決定される分布に従うため、構造に異常が発生した際のデータを学習することなく、現在の測定データとセンサ設置時の計測データのみで診断が可能である.

3. 統計的異常診断法の既存構造物への適用

本研究では本手法を用いて道路トンネル用ジェットファンの構造ヘルスマニタリングシステム構築を行った. ジェットファンは設置箇所がトンネル内であるため、風雨に直接はさらされないものの腐食や、大型トラックによる風圧、接触などによる損傷が激しく、また季節による温度変動や風圧などによる外乱によって荷重条件が大きく変動するため正確な診断がむずかしい. また、山中のトンネル内に設置されていることが多く、さらにトンネル内は高速で乗用車や大型トラックが行き交う為、点検で立ち入ることは危険であり、通行規制をの点検ではコストがかかり、交通渋滞の原因にもなる. そのため、それら定期点検を不要とする遠隔地モニタリングの要望が大きい. 本研究では、ジェットファンの構造体の腐食や、車両の接触による支持部材の緩みや回転体のアンバランスによる異常振動を想定し、つり下げ用に用いているターンバックルにロードセルを取り付け、その出力からそれらの検知を試みた. 実験は実使用中のジェットファンと、異常状態の診断精度検証のための研究用ジェットファンの二つで行った. 今回道路トンネル用ジェットファンの異常診断のため、次式に示す2次の応答曲面を用いた.

$$N_0 = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i N_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} N_i N_j \quad (5)$$

ここで、 N はターンバックルの負荷であり、添え字は0が診断対象のターンバックル、1~3がそれ以外のターンバックルの荷重を示している. 応答曲面は60点の測定データより導出した. 図2は実機ジェットファンでの5ヶ月間の運用におけるF検定値の平均の推移を示す. 試行回数は20回である. F検定を20回行った場合の式4から決定される棄却域、期待値を図中に示す. 図に示されるようにF検定値はほぼ期待値に乗っており、本手法で正常状態を正しく診断可能であることが解る. また、表1に実験用ジェットファンでの診断結果と異常増大に伴うF検定値の推移を

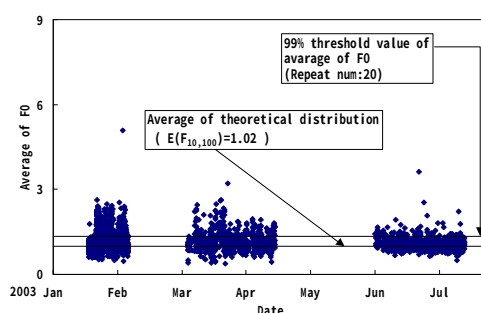


Fig.2. Average of F_0 of actual jet-fan (18/feb to 25/jul/2003)

Table 1. Average of F_0 value and Diagnostic accuracy of damage detection

Looseness[%]	Average of F_0	Diagnostic accuracy
0	0.84	99.45%
40	14.5	99.98%
60	15.6	100.00%
80	21.5	100.00%
100	24.6	100.00%

示す. 今回ジェットファンの緩みを異常と定義した. 異常の増大に従い検定値は大きく増大し、本手法で容易に損傷・異常の検知が可能であることが解る. 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構造の損傷・異常状態に関する情報を利用する事なく、高い精度で正常・異常の診断を本手法では可能とする.

4. 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・異常時のデータなしに損傷・異常診断を行う手法の提案を行った. また、通常送風機として用いられる道路トンネル用ジェットファンに本手法を適用し、その有効性を実験的に実証した.

参考文献: 岩崎篤, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 日本機械学会論文集, A編 68-673(2002) 1292-1297