

包絡線スペクトル、信号融合およびLSM主成分分析を用いた 回転機械構造系異常の精密診断法

Precise Diagnosis Method of Structural Fault for Rotating Machinery
Using Enveloped Wave Spectra, Signal Fusion and LSM Principal Component Analysis

三重大学大学院	陳山 鵬	Ho JINYISMA	Member
三重大学大学院	滝 浩太郎	Kotaro TAKI	Non Member
三重大学大学院	李 可	Ke LI	Non Member
三重大学大学院	薛 紅涛	Hongtao XUE	Non Member

Abstract : Structural faults are often occurring in a rotating machine, such as, unbalance, misalignment and looseness etc., and their feature spectra of vibration signal appear in the low frequency area. The precise diagnosis for the structural faults type is difficult in the real plant, because of the noise in the vibration signal and the complex structure of the plant machine. In this study, we proposed the precise diagnosis method of structural fault for rotating machinery using enveloped wave spectra, signal fusion and LSM (Least-squares mapping) principal component analysis. The method proposed here has been verified by practical diagnosis.

Keywords: Rotating Machine, Structural Fault, Condition Diagnosis, LSM Principal Component Analysis

1. 緒言

回転機械に起きる構造系異常とはアンバランスやミスアライメント、締め付け具のゆるみ等といった機械の構造的な異常であり、比較的低周波の振動を生ずる。これらの異常状態に関する共通な特徴は正常状態に比べて、回転周波数とその高調波成分がよく変化することが挙げられる。そのため、異常種類の特定（精密診断）は難しい場合が多く、診断システムの中で自動診断するための有効な方法も確立されていない⁽¹⁾。

そのために、本研究では、まず生信号のスペクトルおよび包絡線のスペクトルにより構造系異常を総合的に精密診断する方法を提案し、各種異常状態の特徴を明らかにし、精密診断の例を示す。

また、信号融合法およびLSM (Least-squares mapping) 主成分分析法による構造系異常の自動診断法を提案し、実際の例で精密診断の結果例を示す。

2. 信号計測と異常状態

図1に試験研究で使用した実験装置(a)、振動加速度センサーの設置場所(b)および設定した異常種類(c)を示す。

5つの振動加速度センサを用い、加速度センサの取り付け位置は図1(b)に示すように、被駆動軸側における左右の軸受台座に軸方向、右水平方向、右垂直方向、左水平方向、左垂直方向に接着剤で取付けた。

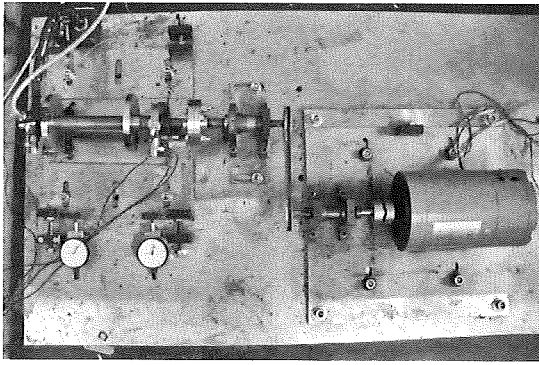
振動加速度信号の測定条件としてはサンプリング周波数を5kHz、サンプリング時間を20sとし、運転条件としては、回転数はポンプ等の回転機械設備を想定したため、3段階(1200rpm, 1500rpm, 1800rpm)に設定した。軸継ぎ手はフランジ型を使用した。

アンバランス状態は図1に示軸に固定してある2枚のフライホイールに、おもりをそれぞれ20(g)装着することによって設定する。おもりの相対角度が0°のものを静アンバランス状態、相対角度が180°のものを動アンバランス状態とする。

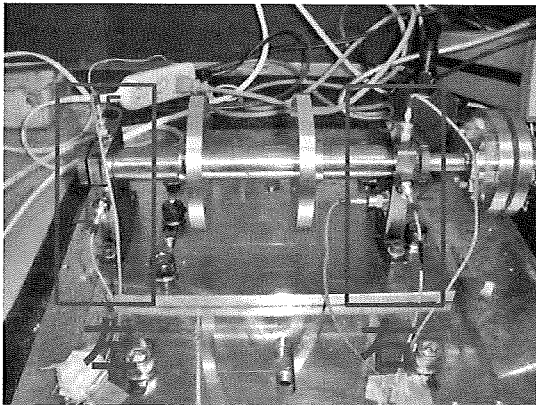
ミスアライメント状態は軸取り付け土台のボルトの締め・緩めによって、回転軸を1°傾けた状態をアングル・ミスアライメント、水平に1.5mm動かした状態をオフセット・ミスアライメントとそれぞれ設定する。

ゆるみ状態は軸継ぎ手のボルトを緩めるものを継ぎ手ゆるみ、被駆動軸側の右軸受台座の固定部を緩めるもの台座ゆるみとそれぞれ設定する。またゆるみ状態の起振力として、フライホイール片側に10(g)のおもりを取り付けた。

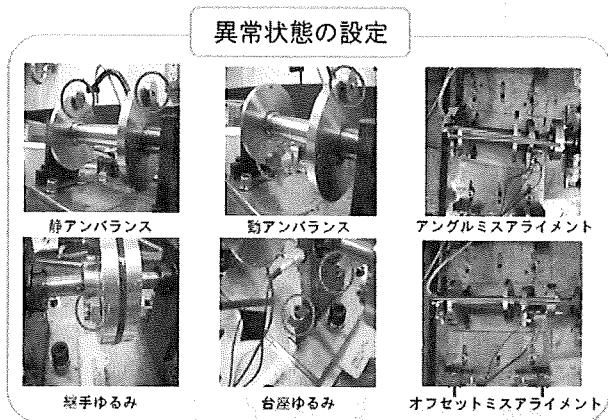
連絡先：陳山 鵬 〒514-8507 津市栗真町屋町1577
三重大学大学院共生環境学専攻
E-mail:chen@bio.mie-u.ac.jp



(a)回転機械シミュレータ



(b)振動加速度センサーの取付位置



(c)設定した異常種類

Fig. 1 Experiment equipment, accelerometer and faults

Table 1 Fault states for the diagnosis tests

運転状態
正常
静アンバランス
動アンバランス
アングルミスアライメント(1°)
オフセットミスアライメント(1.5mm)
継ぎ手ゆるみ
台座ゆるみ

実験時に設定した状態は表1にまとめて示す。すなわち、異常状態は4種類の構造系異常状態で、静アンバランス、動アンバランス、アングルミスアライメント、オフセットミスアライメント、継ぎ手ゆるみ、台座ゆるみである。

3. 包絡線スペクトルによる精密診断法

図2は軸方向における生信号のスペクトル(回転数:1200rpm)を示す。この図を見れば分かるように、正常状態のスペクトルに比べて、ミスアライメントと緩みの時には軸方向の振動の特徴が大きく変わるが、アンバランス状態の時には殆ど変らない。また、ミスアライメントの時には回転周波数成分(20Hz)と2~3倍の高調波成分が大きくなっているが、緩みの時にも回転周波数(20Hz)と3倍以上の高調波成分も大きくなっている。

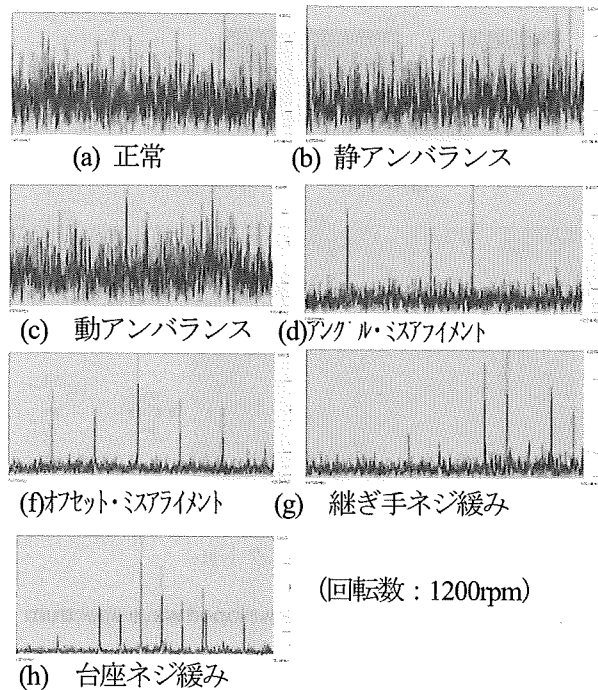


Fig. 2 Spectra of raw vibration signals in the shaft direction

同様に水平方向における生信号のスペクトルを用いても異常種類の識別が困難であった。このように生信号のスペクトルを用いて、動・静アンバランスの識別、およびミスアライメントと緩みとの識別が困難な場合が多いので、以下のように包絡線スペクトルを用いて、各状態の識別法を説明する。図3は包絡線スペクトルを求める流れ図を示す。図4は包絡線スペクトルを求める実例を示す。

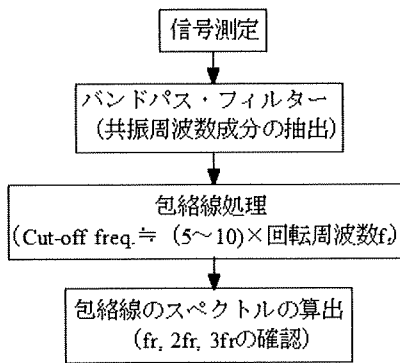


Fig. 3 Flowchart of calculating enveloped wave spectrum

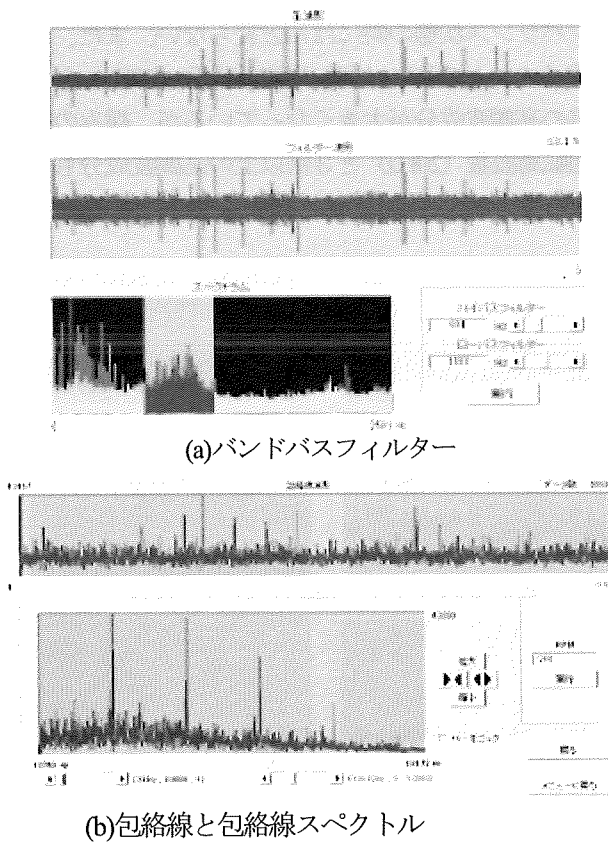


Fig. 4 Example of calculating enveloped wave spectrum

図5には軸方向の包絡線スペクトルを示している。これらのスペクトルの中に特に動アンバランスと静アンバランスの識別ができるようになったが、緩みの特徴が鮮明に出ていない。

緩みとミスアライメントとの識別のために、図6には水平方向の包絡線スペクトルを示している。これらの図で分かるように、ミスアライメントの包絡線スペクトルには回転周波数(20Hz)成分とその高調波が現れているが、緩みの包絡線スペクトルには1/2回転周波数(10Hz)成分とその高調波が現れている。このように、緩みとミ

スアライメントとの識別ができるようになった。

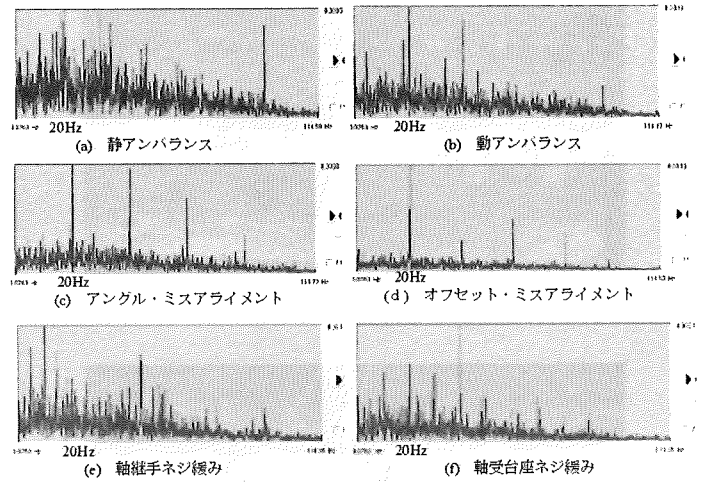


Fig.5 Enveloped wave spectra in the shaft direction

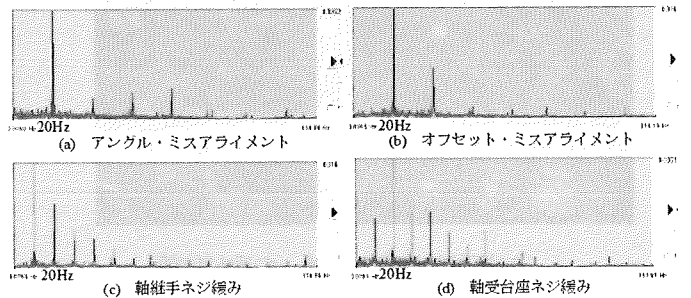


Fig.6 Enveloped wave spectra in the horizontal direction

以上のように、水平・軸方向の振動波形および包絡線スペクトルを用いて、総合的に分析すれば、構造系異常の精密診断が可能である。なお、現場設備の場合は、ノイズのレベルがもっと大きくなるので、適切なノイズ除去および臨機応変的な分析が必要と考える。

4. 特徴パラメータと信号融合法

4.1 特徴パラメータ

測定した離散の時系列データを $x_i (i=1\sim N)$ データ点数を N とすると、様々な特徴パラメータ⁽¹⁾ について識別指標 $DI^{(1)}$ で評価した結果、今回以下の特徴パラメータを用いた。

(1) 時間領域の特徴パラメータ：

$$\text{ピーク歪度} : p_6 = \frac{\left| \sum_{i=1}^N (x_{pi} - \bar{x}_p)^3 \right|}{\sigma_p^3} \quad (4.1)$$

ここで、 x_{pi} はピーク値（極大値）であり、 \bar{x}_p と σ_p はそれぞれピーク値（極大値）の平均値と標準偏差である。

(2) 周波数領域の無次元特徴パラメータ
まず、平均周波数と標準偏差を

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^I f_i \cdot F(f_i)}{\sum_{i=1}^I F(f_i)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (f_i - \bar{f})^2 \cdot F(f_i)}{I}}$$

と定義しておく。

P₈: 単位時間あたり時間平均をクロスする頻度

$$P_8 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I f_i^4 \cdot F(f_i)}{\sum_{i=1}^I f_i^2 \cdot F(f_i)}} \quad (4.2)$$

P₉: 波形の安定指数

$$P_9 = \frac{\sum_{i=1}^I f_i^2 \cdot F(f_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^I F(f_i) \sum_{i=1}^I f_i^4 \cdot F(f_i)}} \quad (4.3)$$

P₁₀: スペクトルの幾何平均

$$P_{10} = \sqrt[I]{\prod_{i=1}^I F(f_i)} \quad (4.4)$$

P₁₁: スペクトルの算数平均

$$P_{11} = \frac{\sum_{i=1}^I F(f_i)}{I} \quad (4.5)$$

4.2 信号融合

測定箇所が異なる振動信号をもとに算出された特徴パラメータは、その種類が同じでも診断対象設備の状態を表す独立した説明変数と見なすことができる。そこで本手法では各加速度センサで計測した信号から求める複数の特徴パラメータから識別感度が高いものを抽出し、一つの信号として融合する。その融合のしかたで以下の4パターンに分ける。

例としてパターン1の融合法のイメージを図7に示す。

- ・パターン1: 右水平と左水平方向の信号融合
- ・パターン2: 右垂直と左垂直方向の信号融合
- ・パターン3: 右水平と左水平と軸方向の信号融合
- ・パターン4: 右垂直と左垂直と軸方向の信号融合

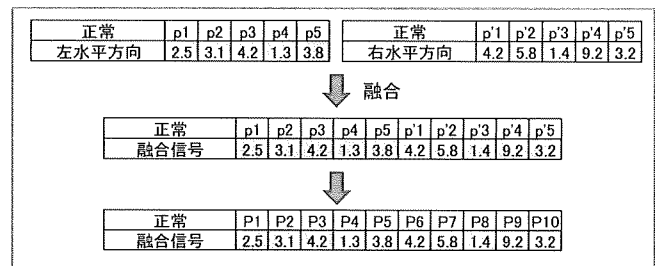


Fig.7 Example of signal fusion on pattern one

5. LSM主成分分析法による診断法

図8にはLSM主成分分析法による解析手順を示す。まず、実験で得られた各状態の時系列信号を信号処理のために8分割する。その後、分割された信号の各周波数成分に対し識別指標DIの閾値を0.5とした統計情報フィルタ⁽¹⁾を行い、各異常状態の特徴成分を抽出する。なお、この閾値は経験則に基づき定めた。また、バンドパスフィルタで分けられた信号から診断用の各特徴パラメータを算出し、正常状態と各異常状態との識別指標DIを用いて相対的に識別感度の良い無次元特徴パラメータ(式(4.1)～(4.5))を5つ選定した。主成分分析法による特徴パラメータの統合を行う前処理として最小2乗射影法(LSM)⁽²⁾により各特徴パラメータの相関性を強化する。その後選出した5つの特徴パラメータを用いて先に述べた4パターンの信号融合を行い、LSM主成分分析法(すなわち、最小2乗射影法+主成分分析法)により算出する2つの統合パラメータ(第1、2主成分)を用いて状態の識別を行う。

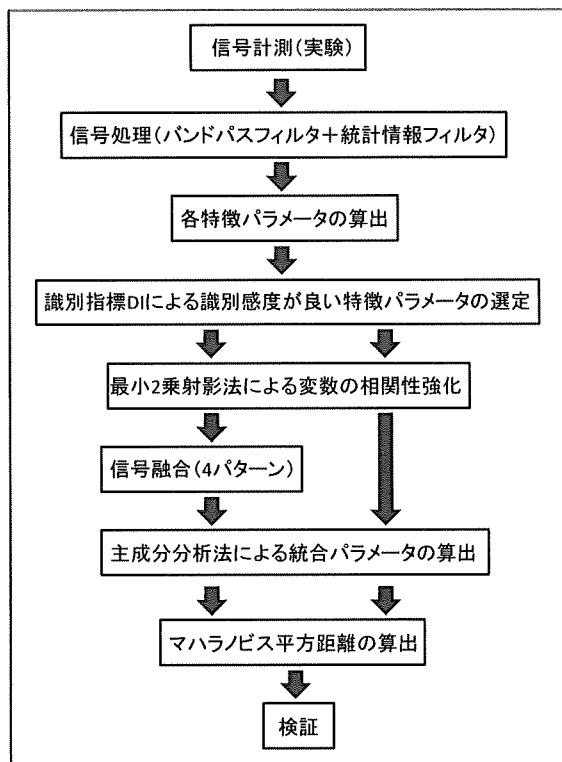


Fig.8 Flowchart of LSM principal component analysis

総合的に評価した結果、高周波数帯域（1000～2500Hz）におけるパターン2の融合信号は最も診断精度が高いことがわかった。このことを確認するため、パターン2の融合信号の周波数帯域（1000～2500Hz）における統合パラメータ座標系の各状態の分布図を図9、10に示す。

図9、10を見れば分かるように、どの回転数においても各状態群が識別に十分な距離で離れて分布しているから、極めて理想に近い結果であると言える。なお、回転数の変化によって各状態群の分布にかなりのばらつきが見られるのは、アンバランス状態など振動値が回転数の変化に依存することの影響であると考えられ、ポンプのように回転数が一定である設備が診断対象である場合は問題がないと言える。以上の結果から、信号融合の有効性及び、LSM主成分分析法による精密診断の有用性が示された。

5. 結論と今後の課題

本研究では、信号融合法およびハイブリッド主成分分析法（最小2乗射影法+主成分分析法）を用いて、構造系異常群を高精度に判別でき、その判別基準を明ら

かにした。

今後は提案した方法を他の異常種類（自励系異常、衝撃系異常など）にも適用し、また、汎用性を持たせるために、実際の現場での検証を行う予定である。

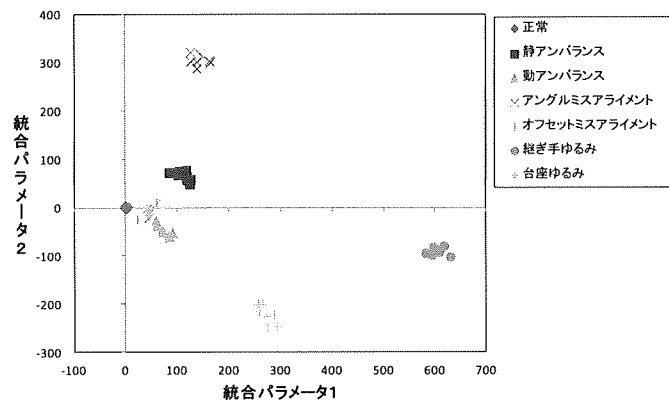


Fig.9 Distribution of states on first and second principal components (pattern 2, 1200rpm)

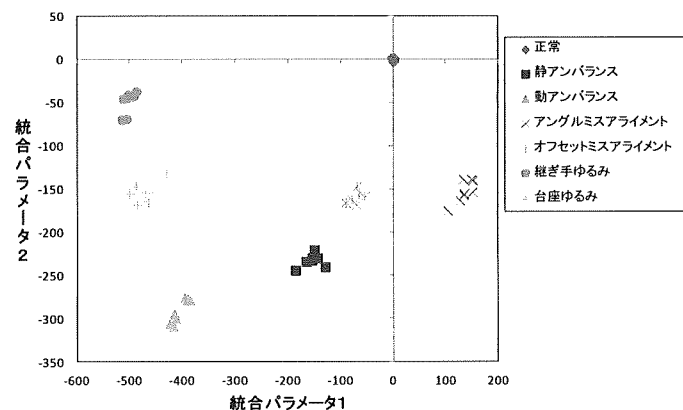


Fig.10 Distribution of states on first and second principal components (pattern 2, 1500rpm)

参考文献

- [1] 陳山 鵬：「社会・生産プラントの安全・安心のための回転機械設備診断の基礎と応用」，三恵社出版、2009.
- [2] 陳 鵬，豊田利夫：最小自乗射影法による故障診断精度の向上法、日本設備管理学会誌、第7巻、第3号、1995、pp.162-166.

(平成24年6月15日)