1201 適応信号処理アルゴリズムによる転がり軸受の音響診断技術

Acoustic Diagnosis Technique for a Failure Rolling Bearing
By Adaptive Signal Processing Algorithm

○ 正 太田 博 光 (水産大) 正 瀬戸 邦 聰 (佐賀大)

Hiromitsu OHTA, Dept. of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University,
2-7-1, Nagata-honmachi, Shimonoseki.

Kunisato SETO, Dept. of Mechanical Engineering, Saga University, 1, Honjo-machi, Saga.

Key Words: Acoustic, Diagnosis, Adaptive Signal Processing Algorithm, Adaptive Filter, Rolling Bearing

1. 結 言

機械設備の異常診断では異常情報を得るために目的に応じたセンサが選択される。回転機械の異常診断では一般的に SN 比の関係から圧電型加速度ピックアップが用いられているが診断対象に設置する煩わしさや測定環境によっては設置自体が困難な場合が多々ある。これらを解消するために圧電型コンデンサマイクロホンを使用して非接触的に診断を行う方法があるが SN 比や外部騒音の問題があり実用的には今一步である。本研究では適応信号処理法で用いられている適応フィルタ^①により転がり軸受の音響診断を行っている。固定されたフィルタ係数を用いた音響診断^{②③}であっても診断対象の運転状態が定常的もしくは運転パターンが把握できていれば診断精度の減少は少ない。しかしながら予測不可能な非定常運転を行う設備を対象とした診断には不向きである。今回、適応信号処理アルゴリズムとして^④適法に基づいて導出された LMS アルゴリズム、適応格子型(Gradient Adaptive Lattice)アルゴリズムおよび最小二乗法に基づいた最小二乗格子型(Least Squares Lattice)アルゴリズムを線スペクトル強調器に適用し音響診断への有効性を検討している。検討方法としては回転シミュレータに異常転がり軸受を装着し単一コンデンサマイクロホンから得られた信号を DSP 上の各アルゴリズムのプログラムを実行し出力結果から得られる SN 比を比較し診断精度を検討している。

2. 適応信号処理

2.1 線スペクトル強調器 線スペクトル強調器は適応信号処理の基本的な問題の 1 つでありノイズに埋もれた信号を抽出する手法として知られている。

$$\hat{x}_t = -\sum_{n=1}^p w_n x_{t-n} \quad (1)$$

$$x_t = s_t + n_t, \quad e_t = x_t - \hat{x}_t \quad (2)$$

ここで、 x_t : 測定される信号、 w_n : 次数 n におけるフィルタ係数、 $\hat{x}_t$: 予測される時系列、 s_t : 所望信号、 n_t : 定常白

色雑音、 e_t : 予測誤差。適応信号処理では予測誤差を最小にする方向にフィルタ係数が更新され所望信号が強調されノイズは除去される。本研究では予測誤差を最小にするための適応信号処理アルゴリズムとして LMS アルゴリズム(以下、LMS と略。), GAL アルゴリズム(GAL と略。), LSL アルゴリズム(以下、LSL と略。)を用いる。

2.2 適応信号処理アルゴリズム

・正規化 LMS アルゴリズム 最急降下法の瞬時値を取ったアルゴリズムが LMS であり、フィルタ係数更新式は式(3)となる。式(4)の忘却係数を導入し収束特性を改善したものは正規化 LMS アルゴリズムと呼ばれる。

$$\bar{w}_{t+1} = \bar{w}_t + \frac{2\mu}{\sigma_t^2} \phi_t e_t \quad (3)$$

$$\sigma_t^2 = \lambda \sigma_{t-1}^2 + (1-\lambda)x_t^2 \quad (4)$$

σ_t^2 : 信号 x_t の分散、 μ : 収束特性を決めるステップサイズパラメータ、 ϕ : フィルタ入力ベクトル、 λ : 過去のデータの影響を減衰させる忘却係数。

・GAL アルゴリズム LMS の収束特性はフィルタ入力ベクトルの相関行列の条件数に依存している。この点を改良したのが GAL アルゴリズムである。線スペクトル強調器では予測誤差のみが必要である。予測誤差の更新式は以下で表される。

$$f_t^{m+1} = f_t^m + \rho_t^{m+1} f_t^m \quad (5)$$

$$r_t^{m+1} = r_{t-1}^m + \rho_t^{m+1} f_t^m \quad (6)$$

$$\rho_{t+1}^{m+1} = \rho_t^{m+1} - \mu^{m+1} (f_t^{m+1} r_{t-1}^m + r_t^{m+1} f_t^m) \quad (7)$$

f_t^{m+1} : 前向き予測誤差、 r_t^{m+1} : 後向き予測誤差、 ρ_t^{m+1} : PARCOR 係数

・LSL アルゴリズム 勾配法に基づいた LMS, GAL アルゴリズムと異なり最小二乗法により導出されており一般的に収束特性が優れている。予測誤差の更新式を以下に示す。

$$\Delta_N^{m+1} = \lambda \Delta_N^m + f_N^m r_{N-1}^m / \theta_N^m$$

$$F_N^{m+1} = F_N^m - (\Delta_N^{m+1})^2 / R_N^m$$

$$R_N^{m+1} = R_N^m - (\Delta_N^{m+1})^2 / F_N^m$$

$$\alpha_N^{m+1} = -\Delta_N^{m+1} / R_N^m \quad \dots (8)$$

$$\beta_N^{m+1} = -\Delta_N^{m+1} / F_N^m$$

$$f_N^{m+1} = f_N^m + \alpha_N^{m+1} r_{N-1}^m$$

$$r_N^{m+1} = r_{N-1}^m + \beta_N^{m+1} f_N^m$$

$$\theta_N^{m+1} = \theta_N^m - (r_{N-1}^m)^2 / R_N^m$$

Δ_N^{m+1} : 共分散, F_N^{m+1} : 前向き残差分散, R_N^{m+1} : 後ろ

向き残差分散, α_N^{m+1} : 前向き PARCOR 係数, β_N^{m+1} :

後ろ向き PARCOR 係数。

3. 実験方法および結果

実験は外輪傷がある転がり軸受を回転シミュレータにセットし回転数 1500rpm 一定で行った。軸受から 50mm の位置に 1/4inch コンデンサマイクロホンを設置し測定を行っている。各アルゴリズムの有効性は TI 社の TMS320C6711DSK をコンピュータでコントロールすることで検討している。各アルゴリズムともカットオフ周波数は 3.2kHz である。LMS の遅延器数 5, ステップサイズパラメータ 10×10^{-2} , 忘却係数は LMS, LSL 共に 0.995 とする。図 1 は LMS および LSL の収束特性を示している。縦軸は平均二乗誤差, 横軸はフィルタ係数を更新する際の計算回数を表している。収束速度は LMS より LSL が優れており, 平均二乗誤差に関しても LSL が少なく優れていることが分かる。非定常な設備の診断に適用する場合は LSL が好ましいと思われる。図 2 は LMS, LSL を適応していない場合の音を 1/3 オクターブ処理したものである。図 3, 図 4 はそれぞれ LMS, LSL を適応し予測誤差(ノイズ)を除いた出力を 1/3 オクターブ処理したものである。適用しない場合オーバーオール値で 220dB, LMS 適用で 180dB, LSL 適用で 176dB であり LSL が 4dB, LMS より優れていた。

4. 結 言

線スペクトル強調器による転がり軸受の音響診断を行った。適応信号処理アルゴリズムとして正規化 LMS, GAL, LSL を採用し診断精度の検討を行った結果, 収束特性は LSL が優れており, 診断精度においても LSL が LMS よりも 4 dB 優れていることが判明した。また非定常運転を行う回転機械の診断では収束特性の良い LSL が好ましいと思われる。

Fig1 Convergence character of LMS and LSL algorithm
[dB/1.00 m/s²]

Fig2 1/3 octave band analysis not applied adaptive filter
[dB/1.00 m/s²]

Fig3 1/3 octave band analysis in the case of LMS algorithm

Fig4 1/3 octave band analysis in the case of LSL algorithm

文 献

- ① 飯國洋二, 適応信号処理アルゴリズム, (2000), pp.1-100, pp.127-149, 培風館.
- ② Hiromitsu OHTA and Kunisato SETO, "Acoustic Diagnosis on a Rolling Bearing Based on Presumption of a Division Term by Locally Stationary AR Model", Inter Noise 2003, CD-ROM, N1025, 2003.
- ③ 太田博光・瀬戸邦聰, 正確な区分時点推定に基づく局所定常 AR モデルによる転がり軸受の音響診断, 機軸論, 70-691, C(2004).