振動法によるボールベアリング油切れ異常の 監視システムの警報の信頼性* (カルマンフィルタと指数形加重移動平均法の比較)

福田 隆文^{*1}, 任 新生^{*2}, 清水 久二^{*3}

Alarm Reliability in Vibration Monitoring of Ball Bearing Seizure due to Lubrication Scarcity (Comparison between Kalman Filter and Exponentially Weighted Moving Average)

Takabumi FUKUDA, Xin-sheng REN and Hisaji SHIMIZU

This paper examines alarm reliability based on the vibration monitoring of rotary machinery. Two procedures for diagnosing bearing condition are compared experimentally. One is the Kalman filter combined with Bayes' theorem and the other is the exponentially weighted moving average method. In the experiment, the rotor is operated at a constant speed and the vibration level is monitored. Increased vibration due to bearing seizure is detected by the methods mentioned above. The results show that 1) the moving average method can detect relatively faster than the method using the kalman filter but sometimes leads to a false alarm, and 2) in monitoring using the Kalman filter, no false alarm is observed, which means that higher alarm reliability can be obtained by the Kalman filter.

Key Words: Rotary Machinery, Vibration of Rotating Body, Roller Bearing, Alarm Reliability, Vibration Monitoring, Kalman Filter, Exponentially Weighted Moving Average

1. は じ め に

プラント設備の複雑化, 熟練オペレータの減少というなかで, ますます『管理責任』の重要性がクローズアップされている。一方, 近年のコンピュータの著しい発達から, 設備の監視の自動化, つまり異常の判定とそれに基づくシャットダウンの自動化が進んでいる。このような状況下では, 次の二つ, すなわち,

- ・シャットダウンの遅れ, あるいは機会喪失による被害の発生,
- ・誤ったシャットダウンによる損失(=利益の逸失)の発生,

が問題となる。これらはトレード・オフの関係にある。よって, 監視システムを構築する際には, この二つの側面から検討して適当な手法を選択しなければならぬ。ところで, 従来は振動計測値とあらかじめ定めてあるしきい値とを比較する方法が広く用いられてきた。この方法はノイズ, 外乱などに弱く, 誤報を発生しやすいという欠点があった。この点を改善する手法と

して移動平均法, ベクトル変化, スペクトル変化などを用いて監視する方法がある⁽¹⁾。著者らはカルマンフィルタとベイズの定理を組合せた監視システムを提案してきた^{(2)~(4)}。これらの手法を上記視点から比較することは重要である。そこで本論文では, この点に着目し, オンラインでの信号処理に適する移動平均法とカルマンフィルタの比較を行う。また, カルマンフィルタを用いる場合, 組込まれるシステムパラメータの値により警報の信頼性が大幅に変化するのであれば, 実用的に用いるのが極めて困難となる。そこで, システムパラメータと警報の信頼性の関係について考察する必要がある。以上の観点から,

- ・定常運動中の回転機械の転がり軸受の振動のオンライン監視を対象に,
- ・カルマンフィルタと指数形加重移動平均法を用いた警報システムについて,
- ・警報の迅速性と誤報の発生度合, 換言すれば警報の信頼性を比較, 検討した。

具体的には, 試験ロータを作成し, そのジャーナル軸受の一つを潤滑不良状態にして破損に至る状況を実験的に作り出した。そして, 上記の二つの方法により, 破損の前兆である振動の増加を早期に検知することを試み, 両者の比較およびカルマンフィルタのシステム

* 原稿受付 平成4年8月18日。

^{*1} 正員, 横浜国立大学工学部(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

^{*2} 横浜国立大学大学院 [現: 横河電機(株)]。

^{*3} 横浜国立大学工学部。

パラメータの影響の検討を行った。

2. 理 論

2・1 カルマンフィルタ 本論文集においても、カルマンフィルタの応用が数多く報告されているので、理論の詳細な説明は省く。本論文で扱うのは制御入力がなく、しかも一次元で、状態方程式、観測方程式が式(1)、(2)で示される場合⁽⁵⁾である。

$$x(k) = Ax(k-1) + w(k-1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y(k) = Cx(k) + v(k) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$x(k)$: 離散時刻 k における軸受振動値(状態量)

$y(k)$: 離散時刻 k における軸受振動値(観測値)

A : システムパラメータ

C : 観測パラメータ

$w(k)$: システムに加わる外乱

$v(k)$: 観測ノイズ

ここで、振動が定常状態であることに対応するカルマンフィルタ1と、軸受破損の前兆である振動の増加状態に対応するカルマンフィルタ2を用意する。カルマンフィルタ1では振動値は一定であると考えから、そのシステムパラメータ $A_1=1$ である。カルマンフィルタ2では時間と共に振動値が増加するから、 $A_2 > 1$ である。 A_2 の値は、実測データから定めることができる。システムが状態1であるとカルマンフィルタ1で生成される残差 γ_1 は、平均0の正規分布に従う。システムが状態2であると、 γ_2 は平均0の正規分布に従う。この性質とベイズの定理を組合せることにより、

システムが状態1, 2である確率 $p_1(k)$, $p_2(k)$ は、(3)式で与えられる^{(2)~(4)(6)}。

$$p_i(k) = \frac{N(\gamma_i(k); 0, V_i(k)) \cdot p_i(k-1)}{\sum_{j=1}^n \{N(\gamma_j(k); 0, V_j(k)) \cdot p_j(k-1)\}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $N(\gamma_i; 0, V_i) = \frac{1}{(2\pi V_i(k))^{1/2}} \cdot \exp\left(-\frac{\gamma_i(k)^2}{2V_i(k)}\right)$
 $N(\gamma_i; 0, V_i)$ は、平均0、分散 V_i の正規分布に従う確率変数の値が γ_i となる確率密度である。軸受の振動が増加している確率 $p_2(k)$ があらかじめ決めておくしきい値を越えた場合、警報を出すことにする。

2・2 指数形加重移動平均法 本手法は R. G. Brown⁽⁷⁾により始められた移動平均法の一つである。離散時刻 k における振動値を $X(k)$ とすると、移動平均値 $\bar{X}(k)$ は、平滑化定数 α を用いて、

$$\bar{X}(k) = \alpha X(k) + (1-\alpha) \bar{X}(k-1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(0 \leq \alpha \leq 1)$$

となる。 $\bar{X}(k)$ では、 $X(k)$ に重畳されているノイズ、外乱の影響が平滑化されている。したがって、 $\bar{X}(k)$ の値をもとに軸受の振動を監視すれば、個々のデータ $X(k)$ を基に判定するのに比べ、信頼度の高い判定が可能と考えられる。次のようにして、本手法をオンライン監視に適用した。

(1) 被監視システムを起動し定常状態になったら、振動の計測を開始し、 $k=1$ より B までの間 $\bar{X}(k)$ を求める。

(2) $\bar{X}(k) (k=1, 2, \dots, B)$ から、 $\bar{X}(k)$ の標本平均 $\bar{\bar{X}}(k)$ と標本標準偏差 $s_{\bar{X}}$ を算出する。

Heavy lines indicate that the alarms activate.

図1 軸受振動の様子と記号の定義

(3) (2)より, しきい値 $\bar{X}_{th} = \bar{X}(k) + K \cdot s_{\bar{x}}$ (K : 定数)を定める. $\bar{X}(k) > \bar{X}_{th}$ ($k = B+1, B+2, \dots$)となったとき, 警報を出す.

2.3 用語の定義-誤差発生率, 判定時刻 破損に至るまでの軸受振動の様子を模式的に示すと図1のようになる. これから, 以下において用いる誤差発生率, 判定時刻を次のように定義する.

誤差発生率(FAR):

$$FAR = \frac{\text{定常状態での監視時間内で警報(誤報)の出ている時間}(\sum T_i)}{\text{定常状態での監視時間}(T_{ob})} \times 100[\%]$$

.....(5)

ここで, 定常状態での監視時間(T_{ob})は図1のように, 振動が初期の3倍となるまでの時間 T_{ref} の0.8倍とした**1.

判定時刻(t_d): 破損に至るまで継続した警報の発生時刻

なお, 図, 表中の添え字(KF), (MA)はそれぞれカルマンフィルタ, 指数形加重移動平均法での値であることを示す.

3. 実験

3.1 実験装置および方法 実験装置を図2に示

図2 実験装置

す. 軸受はすべて自動調心軸受(UC 204)で, 供試軸受上には圧電形加速度センサを取付けた. 加速度信号は振動計で増幅し, A-Dコンバータを用いて1秒間隔でサンプリングし, パーソナルコンピュータに取り込んだ. サンプリング間隔が1秒であるから, 離散時刻はそのまま試験開始からの経過時間[秒]となる. 試験軸は3相誘導電動機を用いて駆動した. 供試軸受は, 軸受内に封入されているグリースをアセトンで洗浄してから使用し, 適当な時間で破損に至るように条件設定した. 破損に至るまでの時間は約40分から約3時間であった. 破損した軸受を図3に示す.

3.2 カルマンフィルタおよび指数形加重移動平均法のパラメータの決定 2章に述べたカルマンフィルタおよび指数形加重移動平均法のパラメータを決定した. 用いたデータを図4および表1の(1), (2), (3)に示す. なお, 同表の実験番号4~17については4.2節で考察する.

3.2.1 A_2 の決定 $A_2 = 1.001, 1.002 (=1.001^2), 1.004 (=1.001^4)$ の比較を行った. 表1の(1), (2), (3)から, A_2 の値が小さいほど判定が早いことがわかる. これは, 初期の増加割合の小さいときに検知できるからと考えられる. しかし, 予備実験の段階で, $A_2 = 1.001$ としたとき, 誤報が発生することがあった. よって, 本実験においては, 1.002を選定した.

3.2.2 B の決定 B を変えたときの $\bar{X}, s_{\bar{x}}$ の変化の様子を図5に示す. これより, $B = 500$ 以上であれば, $\bar{X}, s_{\bar{x}}$ はほぼ一定となることがわかる. よって, $B = 500$ とする.

3.2.3 K, α の決定 $B = 500$ として, K, α を変化させ, 誤報発生率と判定時刻を求めた. 図4(a)のデータに対する結果を図6に示す. これより, 次の

図3 軸受の破損状況

**1 今回の実験では, 0.8 とすれば監視時間内は定常とみなせた.

ことがわかる。

- $K=2$ では誤報発生率が高いが, $K=3$ 以上では小さな値となり, かつ K が大きくなる程減少する。
- $K=2, 3, 4$ の範囲内では, 判定時刻はほぼ一定であるが, $K=5$ では遅くなる。

よって, $K=4$ が適当と判断した。また, 次のことがわかる。

- $\alpha=0.1$ では誤差割合が高くなる。
- $\alpha>0.3$ では判定時刻が遅くなる。

よって, $\alpha=0.2$ が適当と判断した。ほかの二つでも同様の考察を行った。

3・3 実験結果 以上のパラメータを用いたカルマンフィルタおよび指数形加重移動平均法による判定の例を図7に示す。また, 17回の実験結果を表2に示す。表中, (1), (2), (3)は, 3・2節で用いたデータである。

最終判定時刻は, 指数形加重移動平均法の方がカルマンフィルタに比べ早いことがわかる。判定時刻の差

表 1 A_2 による判定時刻, 誤報発生割合の変化

Experiment number	System parameter A_2					
	$A_2=1.001$		$A_2=1.002$		$A_2=1.004$	
	Decision time [sec.]	False alarm rate [%]	Decision time [sec.]	False alarm rate [%]	Decision time [sec.]	False alarm rate [%]
(1)	9145	0	9147	0	9147	0
(2)	3340	0	3491	0	3491	0
(3)	2599	0	2601	0	3601	0
4	2080	0	2109	0	2169	0.3
5	5782	0	5680	0	5881	0
6	11584	0	11657	0	11701	0
7	5096	0	5090	0	5094	0
8	3755	0	3749	0	3747	0
9	5679	0	5670	0	5943	0
10	3454	0	3450	0	3450	0
11	9098	0	9309	0	9310	0
12	3358	0	3477	0	3564	0
13	3207	0	3438	0	3512	0
14	5626	0	5643	0	5948	0
15	2014	0	2368	0	2371	0
16	3019	0	3424	0	3527	0
17	2702	0	2758	0	2862	0

図 4 パラメータ決定に用いたデータ

のヒストグラムを図8に示す。このデータより、判定時刻に有意差があるかを調べたところ、有意水準5%で差ありとなった。最も大きな差は532秒(8分52秒)であるが、80%は4分以内であった。また、カルマンフィルタにおいても、すべての場合に破損に至る前に警報を出しており、欠報はなかった。

次に、誤報発生率について比較する。指数形加重移動平均法で誤報を出さなかったのは、17例の試験中5例であり、ほかの12例は少なくとも1回は誤報を発している。一方、カルマンフィルタはまったく誤報を出していない。

4. 考 察

4.1 警報の信頼性 指数形加重移動平均法では誤報が多いが、これは、判定が振動の大きさに基づいて行われるため、寿命到達以前でも、軸受の振動が一時的に増加した場合に誤報がしやすい状況になるからである。また、 $K=4$ では、 $(\bar{X} + 4s_{\bar{X}})/\bar{X} \approx 1.1$ である

が、 $\alpha=0.2$ であると、突発的なノイズを含んだ平均値の1.5倍のデータが一つ入ると、移動平均値が1.1倍になり、それだけで誤報を発生する。

カルマンフィルタは、振動の増加の割合を基に判定するので、運動中に生じる緩慢な変化に対しては、これを転がり寿命に至る振動の増加とは違うものと識別している。また、適当な誤差分散を選択することにより、耐ノイズ性を確保できる。しかし、カルマンフィルタを定常性の監視に用いると徐々にカルマンゲインが低下し、システムの状態の変化に対する感度が鈍くなる⁽⁴⁾。この問題については、別途検討する予定である。

両者を比較したところ、警報の迅速性では移動平均法が優れており、誤報率ではカルマンフィルタが優れている。このように相反する結果となったが、カルマンフィルタにおいても軸受破損前に警報がでていることから、今回の試験範囲では、総合的にカルマンフィルタが優れていると判断できる。

4.2 カルマンフィルタのシステムパラメータの口

図5 Bの効果

図6 α , K の効果

バスト性 ここまでは、 $A_1=1$ 、 $A_2=1.002$ とした。 A_1 は定常状態に対応するので1以外の値はとりえないが、 A_2 は振動の増加の割合を示すパラメータであり、この値を変えると警報の迅速性、誤報発生割合が

変化することが考えられる。そこで、 $A_2=1.001$ 、 1.002 、 1.004 として、実験番号4～17のデータを再計算したのが、表1の4～17である。この表より、

(1) A_2 が小さいほど判定時刻が早くなる傾向が

表 2 実験結果

Experiment number	Rotational speed	Procedures				(Reference)
		Exponentially weighted moving average		Kalman filter		
		Decision time	False alarm rate	Decision time	False alarm rate	T _{ref}
	[rpm]	[sec.]	[%]	[sec.]	[%]	[sec.]
(1)	3000	9099	0.2	9147	0	9178
(2)	3000	3328	0.04	3491	0	3415
(3)	3000	2385	0.5	2601	0	2457
4	3000	2106	0	2109	0	2192
5	3000	5622	0.1	5680	0	5690
6	3000	11627	35.8	11657	0	11642
7	3000	5030	72.1	5090	0	5110
8	3000	3744	0	3749	0	3778
9	3000	5645	3.1	5670	0	5847
10	3000	3447	23.5	3450	0	3428
11	3000	9309	0	9309	0	9369
12	2500	3459	0	3477	0	3566
13	2500	3130	0.5	3438	0	3570
14	2500	5570	0.1	5643	0	5950
15	2500	2029	0	2368	0	2391
16	2500	2892	49.3	3424	0	3487
17	2500	2575	31.3	2758	0	2867

(a) サンプル値

(b) カルマンフィルタ

(c) 指数形加重移動平均

図 7 実験結果(例) (Heavy lines under charts indicate that the alarms activate.)

***2 3・2・1項に示したように予備実験の段階において、 $A_2=1.001$ の条件では、誤報が発生することがあった。よって、 A_2 を過小としないよう注意する必要がある。

図 8 判定時刻の差

ある。(ただし、4例では、一部順序が入れ替わっている。)

(2) 誤報発生割合は、この範囲内では実験4で $A_2=1.004$ の条件において運転開始直後に発生したのみで、顕著な差は認められなかった**2。

また、4～17の実験において、振動の増加のようすは必ずしも同じではなかったが、欠報はなく、すべての場合に警報が出ている。

このように、システムパラメータの影響は認められたが、それは警報の信頼性を大きく損なうものではなく、この方式を実用に供する際の障害にはならないと考えられる。

5. 結 論

ボールベアリングが油切れにより破損にいたる際には振動の増加がみられる。このことを基にした振動法

によるボールベアリングの油切れ異常の監視システムを取りあげ、その警報の迅速性と信頼性について、指数形加重移動平均法とカルマンフィルタの比較を主に実験的に行った。その結果、次のことがわかった。

(1) 指数形加重移動平均法は警報の迅速性にすぐれているが、誤報が多い。

(2) カルマンフィルタとベイズの定理を組み合わせた手法は警報の発生がやや遅いが、誤報は全くない。すなわち、その誤報の信頼性が高い。

(3) カルマンフィルタのシステムパラメータの値の警報の信頼性に与える影響は、実用上問題とはならないと考えられる。

誤報は、システムの停止による損失の発生、または警報の軽視、無視に結び付く。カルマンフィルタは指数形加重移動平均法に比べ判定時刻が遅いという点はあるが、誤報を出さないという実用上重要かつ大きな利点を有している。したがって、振動の連続モニタリングには、カルマンフィルタがより適していると考えられる。

文 献

- (1) 安田・伊藤・喜多・正森, 回転機械の異常診断システム, 火力原子力発電, 40-2 (1989), 167.
- (2) 福田・清水, 回転機器の危険速度通過時の振動監視システムの開発, 安全工学, 30-2 (1991), 88.
- (3) 清水, 設備安全工学, (1989), 147, 裳華房.
- (4) 井澤・大石・清水, カルマンフィルタを用いた回転変動のオンライン監視方法, 安全工学, 26-5 (1987), 277.
- (5) Bozic, S. M., *Digital and Kalman Filtering*, (1979), 100, Edward Arnold.
- (6) Willsky A. S., Deyst J. J. and Crawford B. S., Two Self-test Methods Applied to an Inertial System Problem, *J. Spacecraft*, 12-7 (1975), 434.
- (7) Brown R. G., *Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series*, (1962), 101, Prentice-Hall.