回転機械の軸受監視における警報の信頼性の評価* (誤報等により生じる損失に関する考察)

李 軒*¹, 福田隆文*², 清水久二*³

Reliability Evaluation of Alarm by Vibration Monitoring of Rolling Bearing in Rotary Machinery (Consideration of Loss by False Alarm)

Xuan LI, Takabumi FUKUDA and Hisaji SHIMIZU

In this paper, the performance of alarm systems which are based on vibration monitoring is considered. Evaluation and comparison of alarm systems based on loss, e. g. missed prohibit due to false alarm and cost of repair due to missing alarm, are reported. As the high sensitivity and low false alarm rate contradict each other, loss is one of the important indices for alarm system evaluation. Two methods are compared: one is the threshold method (level-checking method) and the other is the Kalman-filter-based method combined with Bayes' theorem. Bench-size machinery is constructed, then its vibration is measured by an acceleration sensor attached on a bearing housing. In each method, parameters are adjusted to minimize the expected total loss. In this situation, the ranges in which the threshold method is applicable and the Kalman-filter-based method is applicable are shown on an ROC (receiver operating characteristic) chart. A generalized procedure for selecting an alarm system using ROC is also discussed.

Key Words: Reliability of Alarm, Vibration Monitoring, Rolling Bearing, Rotary Machinery, Loss, Threshold Method, Receiver Operating Characteristic (ROC) Chart, Kalman-Filter-Based Method

1. はじめに

機械設備の不意の故障による操業の停止あるいは事故の発生による損害の発生を防ぐため、種々の警報が設置されている。警報の目的は異常の検知による故障発生未然防止であるから検知能の向上が望まれるが、同時に誤警報に基づく停止による利益の逸失という損失についても考慮されなければならない。本研究では、先に著者らが示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⁽¹⁾を基礎に、欠報、誤報による損失を最小にするという観点から、カルマンフィルタを用いた方式としきい値を用いた方式の警報系について、ROC(receiver operating characteristic, 動作特性)曲線を用いて比較した。その結果、

- ・ 誤報停止による損失(=利益の逸失)が大きいシステムではカルマンフィルタを用いた方法が有利であること、
- ・ ROC曲線の共通接線の傾きを基に警報系の選択が行えること、

を示した。

近年、計装システムに対する国際規格 IEC 1508 などの制定により防護系の安全性・信頼性の評価尺度が問題となってきた。この傾向は今後ますます活発となり、警報系の総合評価が重要となると考えられる。本研究は警報系の評価の一つの方法を示すものである。

2. 理論-異常検知方法と警報系の評価モデル

本論文は前報⁽¹⁾を基礎としているが、異常検知方式と判定法について簡単にまとめておく。また、考察に用いる ROC 曲線についてはその概要を付録に示す。

2.1 採用した異常検知方式 本論文ではカルマンフィルタとしきい値法を取り上げ、比較する。

カルマンフィルタによる判定では、次の二つの状態方程式、式(1)、式(1)'を用意する。

・ 状態方程式

正常状態の状態方程式

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

$$a=1$$

破損前兆である振動の増加状態の状態方程式

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

* 原稿受付 1996年4月1日、

*¹ 横浜国立大学大学院 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。

*² 正員、横浜国立大学工学部。

*³ 横浜国立大学工学部。

$$a' > 1$$

・共通の観測方程式

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

$$c=1$$

ここで、

$x(k)$: 離散時刻 k における軸受振動の実効値(状態量)

$y(k)$: 離散時刻 k における軸受振動の実効値(観測値)

a, a' : システムパラメータ(ここでは、振動の増加率を示すパラメータ)

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

である。システムがどちらの状態方程式に沿った挙動をするかを、式(1)、(1)'のモデルを組み込んだカルマンフィルタで生成される残差から、ベイズの定理を用いて、振動の推移の挙動が式(1)、(1)'である適合確率を逐次的に求める。そして、振動が増加状態である式(1)'のモデルの適合確率がしきい値を超えたとき、警報を出す⁽¹⁾⁽²⁾。

しきい値法では、振動の計測値 $y(k)$ があらかじめ設定されているしきい値 T を超えた場合に警報を出す。

2・2 正報、欠報、誤報と損失 一般に、警報について次のように分類される(表1)。

正報: 異常の前兆を正しく検知し、破損などの前に警報がでること(軸受の監視では、破損の前兆の振動の増加を検知し、警報を発すること)。

欠報: 破損などに至るまで警報が出ないこと。

誤報: 正常状態であるにもかかわらず誤って警報がでること。

なお、これ以外に正常時に正常と認識する(なにも警報を出さない)というモードがある。監視システムの設計により正報などの割合が変化する。この点について、以下考察する。表1にはシステムの状態と判定およびその確率が示してある。ここで、次のような修復などのコストを考える。

C_1 : 通常の運転に要するコスト

C_2 : 誤報により行う点検費用, 不必要な停止の間の逸失利益

C_3 : 欠報により破損したシステムの修理費用, 停止の間の逸失利益(故障の進展により拡大した修理コストと停止による逸失利益)

C_4 : 異常徴候部品の交換費用, 停止の間の逸失利益(必要な修理のコストと停止による逸失利益)

全コスト C は次式で示される。

$$C = C_1\{1 - P(FA)\} + C_2P(FA) + C_3\{1 - P(D)\} + C_4P(D) \quad \dots\dots\dots (3)$$

本論文では、監視システムの設計により C がどのように変化するかを考察する。

3. 実験および結果

実験装置を図1に示す。軸受は $\phi 10$ の自動調芯軸

Table 1 Decision and its probability and cost

State	Decision			
	Normal		Fault	
	Probability	Cost	Probability	Cost
Normal	$1 - P(FA)$ (Correct decision)	C_1	$P(FA)$ (False alarm)	C_2
Fault	$1 - P(D)$ (Missing alarm)	C_3	$P(D)$ (Correct alarm)	C_4

Fig. 1 Experimental apparatus

受で、うち一つを供試軸受とし適度に内部のグリースを洗浄することでやや潤滑不良の状態とした。その軸受のハウジングに圧電形加速度センサを取付けた。供試軸受は4000 rpmで回転させた。実験では、サンプリング間隔を1秒として振動(実効値)を計測し、パーソナルコンピュータのフロッピーディスクに蓄えた。計測は破損に至るまで続けた。破損に要する時間はばらつきがあったが、約70時間程度であった。実験終了後、データを読み出しながら、カルマンフィルタの a' 、しきい値の T を変えて判定を行い、正報、欠報、誤報のどれに該当するかを調べた。ここでは、加速度の値が正常時の5倍になった点を破損の判定の基準時

(a) Vibration chart

(b) Diagnosis by Kalman filter method ($a' = 1.01$) (c) Diagnosis by threshold method ($T = 100$ gal)

Fig. 2 Vibration chart and diagnoses (Heavy lines under charts indicate that the alarms activate)

点とし、その10分前から基準までの間に警報がであれば正報、基準までに警報がでなければ欠報、基準の10分前より早期で、軸受が正常なときに警報がであれば誤報とした^{**1}。なお、正常時の振動値には2割程度の違いはみられたが、基準時点での振動の増加率が著しいので、これによる基準時点の変動は10秒程度で、誤報・正報率には影響しなかった。

実験は20個の供試軸受について行った。カルマンフィルタを用いた方法における適合確率のしきい値(判断基準)は80%とした⁽¹⁾。

軸受が破損に至るまでの計測・判定例を図2に示す。図2(a)は振動の計測値、(b)はカルマンフィルタ法による判定、(c)はしきい値法による判定であ

Fig. 3 ROC by Kalman filter method

Fig. 4 ROC by threshold method

^{**1} 本実験では潤滑不良を生じさせているので、10分程度で正常状態から破損に至った。また、加速度が正常時の5倍を超えたものはすべて破損に至った。

Table 2 Minimum costs and its conditions

Case number	Kalman filter method				Threshold method				Ratio of costs $C_{\min(KF)} : C_{\min(T)}$
	$C_{\min(KF)}$ [Currency unit]	a' —	$P(FA)$ —	$P(D)$ —	$C_{\min(T)}$ [Currency unit]	T [gal]	$P(FA)$ —	$P(D)$ —	
1	110C'	1.02	0.00	0.90	120C'	67	0.33	0.97	0.92:1
2	119C'	1.01	0.10	0.95	121C'	60	0.45	1.00	0.98:1
3	110C'	1.02	0.00	0.90	131C'	75	0.24	0.90	0.84:1

(a) ROCs of 2 detection methods

(b) Range of $C_I < C_{II}$

Fig. 5 Comparison of 2 detection methods by ROC

る。実験結果から得られた ROC 曲線を図 3(カルマンフィルタを用いた場合)、図 4(しきい値法を用いた場合)に示す。

4. 考 察

まずいくつかのコストの条件を想定して、その場合のコストの最小値 $C_{\min}$ を求める。ただし、通常の運転に要するコスト C_1 は、点検、修理費用 $C_2 \sim C_4$ に比して小さいと思われるので零とした。

(1) $C_1=0C'$, $C_2=50C'$, $C_3=200C'$, $C_4=100C'$ とした場合 (C' は通貨の単位を有する定数)

式(3)より

$$P(D) = \frac{C_2 - C_1}{C_3 - C_4} P(FA) + \frac{C_1 + C_3 - C}{C_3 - C_4} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。したがって、

$$P(D) = 0.5P(FA) + \left(2 - 0.01\frac{C}{C'}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となり、ROC 曲線と接するとき C は $C_{\min}$ となる。 $C_{\min}$ の値は $P(D)$ 軸との切片から求まる。図 3, 4 中

の細線はこの状況を示している。

カルマンフィルタ法の場合、 $a'=1.02$ の点で接し、接線の $P(D)$ 軸との切片は 0.9 となる。式(5)より切片は $(2 - 0.01C/C')$ だから、コストは $C_{\min(KF)}=110C'$ となる。しきい値法の場合、 $T=67[\text{gal}]$ の点で接し、 $C_{\min(T)}=120C'$ となる。両方式を比較すると、カルマンフィルタを用いることで、 $10C'/120C'$ 、つまり 8% 程度のコスト低減が期待できる。これらのことを表 2 にまとめる。

(2) $C_1=0C'$, $C_2=50C'$, $C_3=400C'$, $C_4=100C'$ とした場合(欠報による損失が大きい場合)

この条件では、誤報をある程度許容し、欠報を避けることでコストは最小となる。この条件では、カルマンフィルタ法の場合 $C_{\min(KF)}=119C'$ 、しきい値法の場合 $C_{\min(T)}=121C'$ で、コストはほぼ同じである。

(3) $C_1=0C'$, $C_2=90C'$, $C_3=200C'$, $C_4=100C'$ とした場合(誤報による損失が比較的大きい場合)

(2) とは逆の想定で、この条件ではカルマンフィルタ法で $C_{\min(KF)}=110C'$ 、しきい値法で $C_{\min(T)}=131C'$ となり、カルマンフィルタを用いることで、約 16% の

コスト低減が期待できる。

以上の例ではカルマンフィルタ法がコスト面で有利であったが、以下、このことが $C_1 \sim C_4$ によりどのように変わるか考察する。一般に二つの検知システム I と II があり、それぞれの ROC 曲線 L_I , L_{II} が描けているとする [図 5(a)]。この場合、検知システム I と II のコスト C_I と C_{II} は次式のようになる。

$$C_I = C_1\{1 - P_I(FA)\} + C_2P_I(FA) + C_3\{1 - P_I(D)\} + C_4P_I(D) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$C_{II} = C_1\{1 - P_{II}(FA)\} + C_2P_{II}(FA) + C_3\{1 - P_{II}(D)\} + C_4P_{II}(D) \quad \dots\dots\dots (7)$$

したがって、

$$C_I - C_{II} = -(C_2 - C_1)\{P_{II}(FA) - P_I(FA)\}$$

(a) ROCs of Kalman filter method and threshold method

(b) Range of $C_{KF} < C_T$ for the experimental result

Fig. 6 Comparison of Kalman filter method and threshold method

$$+ (C_3 - C_4)\{P_{II}(D) - P_I(D)\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $C_2 - C_1$ は誤報による利益の逸失(額)、 $C_3 - C_4$ は欠報による損害(額)の拡大と解釈できる。次式が成り立つとき、 $C_I = C_{II}$ となる。

$$\frac{C_2 - C_1}{C_3 - C_4} = \frac{P_{II}(D) - P_I(D)}{P_{II}(FA) - P_I(FA)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

左辺は式(4)の傾き、右辺は接点間を結ぶ線分の傾きである。つまり両辺が等しくなるのは、 L_I と L_{II} に共通接線が引けるときである。また、式(8)より、 $C_I < C_{II}$ となるのは、

$$C_2 - C_1 > \frac{P_{IIA}(D) - P_{IA}(D)}{P_{IIA}(FA) - P_{IA}(FA)} (C_3 - C_4)$$

(接線 A の場合)

かつ

$$C_2 - C_1 < \frac{P_{IIB}(D) - P_{IB}(D)}{P_{IIB}(FA) - P_{IB}(FA)} (C_3 - C_4)$$

(接線 B の場合)

$$\dots\dots\dots (10)$$

となるときである。これを図示すると図 5(b) のようになる。網掛けを施した範囲では監視システム I を用いるのがよい。このように、ROC 曲線が描けると、横軸に欠報による損失拡大(額) ($C_3 - C_4$)、縦軸に誤報による損失(額) ($C_2 - C_1$) をとり、各システムの有効範囲を示すことができる。図 6(a) は今回の実験で得られた ROC 曲線(図 3, 4)を重ねて描いたもので、図 6(b) はカルマンフィルタ法の有効範囲を示している。これより、今回の実験では、 $C_2 - C_1 > 0.128(C_3 - C_4)$ 、つまり誤報による損失(額)が欠報によるものと比して

Fig. 7 ROC curve-schematic diagram

*** カルマンフィルタ法であれば $\alpha'(>1)$ を 1 に近づける、しきい値法であれば T を小さく設定する。

13%以上ではカルマンフィルタを用いたほうがよいことがわかる。

5. 結 論

異常検知系を設計する際には、検知能を高めるため高感度化を計るが、このような場合に必ず誤報による損失が問題となる。本報文では軸受の油切れ異常の監視システムについて損失という観点からカルマンフィルタ法としきい値法を比較した。以下にその結果をまとめる。

(1) 損失を基準に両方式の適用範囲を考察し、カルマンフィルタ法は、誤報の影響が大きい場合に有効であることを示した。すなわち、実験に用いたシステムでは、誤報による利益の逸失(つまり損失)が欠報による損失の拡大の13%以上となる領域ではカルマンフィルタを用いたほうがよいことを示した。

(2) 一般に二とおりの検知方式があり、それぞれのROC曲線が描けているとする。この場合、横軸に欠報による損失拡大(額)、縦軸に誤報による利益の逸失(額)をとると、二つのROC曲線の共通接線と同じ傾きを有し原点を通る2本の直線を境界として、それぞれの損失の小さい領域、つまり適用有効範囲を示すことができる。

前報⁽¹⁾においてカルマンフィルタ法は誤報が少ないという利点があることを示したが、本研究では、こ

のことを損失という尺度を用いて議論し、この利点が発揮される範囲を示した。このことにより、検知システムの評価の一つの手順を示し得たと考える。

卒業研究として実験に取り組んだ元本学学生、山形聡君[現在、日立ソフトウェアエンジニアリング(株)]に感謝する。

付録 ROC 曲線

ROC(Receiver Operating Characteristic-動作特性曲線)は、横軸を誤報率 $P(FA)$ 、縦軸を検出率 $P(D)$ としてプロットしたもので⁽³⁾、監視システムの特徴を表現している。ROCの概略を図7に示す。一般に検出率を高める意図で高感度化する**2と誤報率も高くなり、システムの動作点は右上のほうに移動する。また、検出率を下げる、つまり低感度化すれば誤報率も低減するから動作点は左下へ移動する。全体としては、右上の点と左下の原点を結ぶ曲線になる。

文 献

- (1) 福田隆文・任新生・清水久二, 機論, 59-560, C (1993), 982-988.
- (2) 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), 434-437.
- (3) Van Trees, H. L., *Detection, Estimation, and Modulation Theory -Part I Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory*, (1968), 23-46, John Wiley & Sons.