生産プラントの知的点検・診断ロボット に関する研究（第1報）*

——概念設計および音響信号による設備異常のファジィ診断法——

陳 鵬** 豊田利夫**

Study on Plant Inspection and Diagnosis Robot (1st Report)

— Conceptual Design and Fuzzy Diagnosis of Machine Failures by Sound Information —

Peng CHEN and Toshio TOYOTA

The purpose of this study is to develop the basic theories and techniques for a plant inspection and diagnosis robot. The robot dealt with in this study will work in the large scale unmanned plant or a place with dangerous equipment. It has the ability widely to monitor the condition of plant machinery with only a few sensors, and quickly to discriminate machine failures, in order to guarantee both the quality and quantity of production against accident. In this paper, the conceptual design and the method of failure detection by sound information for a plant inspection and diagnosis robot are discussed, including following contents: (1) the basic function and structure of the plant inspection and diagnosis robot, (2) the calculation method of symptom parameters from sound signal for detection and diagnosis of machine failures, (3) the method of making membership functions of the symptom parameters by possibility measure theory, (4) the method of failure discrimination by the membership functions, (5) examples of practical inspection and diagnosis.

Key words: inspection and diagnosis robot, condition monitoring, machinery diagnosis, membership function, symptom parameters, sound signal, fuzzy diagnosis, possibility measure

1. 緒 言

近年産業界では、競争力を高めるために、製品の多様化やプラントの生産方式の転換により生産の高効率を求め、生産設備の自動化、無人化、および知能化が進んでいる。また、人が接近不可能な設備などの安全性と信頼性への要求の増大に伴い、プラントの点検・診断ロボットに対するニーズは、ますます高まっている^{1)~4)}。

現在のプラントの点検や監視は、主として常設監視装置で設備状態を監視するか、または保全員の定期的なパトロールに頼っている。原子力発電所などで点検ロボットも一部実用されているが、配管部の腐食検査などの局部異常を移動しつつ検査するもので、保全員による巡回点検のように大規模の工場やプロセスなどの設備状態を広い範囲で点検・診断するロボットは存在しない^{1)~4)}。化学工業や鉄鋼業など大型プラントでは従来型の常時監視装置による監視では、多数のセンサや計装工事が必要となり、膨大なコストがかかるだけでなく、監視システム自身にも信頼性の問題点をもたらす。また、保全員による定期点検の場合、点検周期の問題や人為的なミスなどから、異常発見の遅れや異常の見落としがあり、さらに人の接近の困難な箇所の点検などの問題点があるので、従来法では対処困難となりつつある。

従って、著者らは、プラント内の設備の点検・監視を行い、設備異常の早期発見および早期対応を可能とする知的点検・診

断ロボットの基礎研究を行っている。

本論文では、生産プラントの知的点検・診断ロボットの概念設計について検討し、またこのような知的点検・診断ロボットにとって欠かせない「遠隔・広域設備監視技術」の一つである「音響信号による設備点検・診断技術」について次の諸項目を検討する。

- (1) 知的点検・診断ロボットの機能と構成
- (2) 測定された音響信号から異常状態を敏感に感知できる情報量 (I_a, I_p) による兆候パラメータ定義法の提案
- (3) 可能性測度理論による診断用メンバーシップ関数定義法の提案
- (4) 兆候パラメータによる異常状態のファジィ診断法
- (5) 実際応用例

2. 知的点検・診断ロボットの機能と構成

ここでは、生産プラントの知的点検・診断ロボット機能について次のように定義する。

点検診断ロボットとは、必要な時間ごとに必要な経路に沿ってプラント内を巡回し所定の機械および環境の状態を点検および診断し、異常があれば警報を発生するとともに、異常の可能性のある機械を探索接近して自動診断を行い点検診断報告書を発行する知的ロボットである。

このような、知的点検・診断ロボットの持つべき基本機能は次の3項目である。

- (1) 設備データ採取機能

規定の時間に規定の経路に沿ってプラントを巡回し、プラントの設備および環境の状態パラメータを採取する機能。

* 原稿受付 平成6年11月21日

** 正会員 九州工業大学情報工学部（飯塚市川津680-4）

(2) 知的簡易診断機能

設備および環境状態が正常か異常かを自動的に判定し、異常ならば警報を発生し、正常ならば巡回点検を継続し簡易診断報告書を出力する機能。

(3) 知的精密診断機能

簡易診断機能により異常が存在すると判定された設備を探索接近し、自動的に精密診断を行い異常の種類、過酷度、原因を診断しとるべき最適対策を出力する機能。

このような機能を持つ生産プラントの知的点検・診断ロボットを実現するために必要な研究項目は下記のとおりである。

- (1) 設備の異常を敏感に検出できるセンサーの研究・開発。
- (2) センサで採取されたデータから異常の検出および異常種類の識別ができる兆候パラメータの抽出法に関する研究。
なお、兆候パラメータは、異常を検出するための遠隔監視用兆候パラメータと近距離で異常箇所と異常種類を識別するための精密診断用兆候パラメータに分けられる。
- (3) 兆候パラメータを効率よく抽出するために計測されたデータからノイズを除去するデータ処理法に関する研究。
- (4) プラント内の障害物を回避するための視覚情報や距離情報などによる環境認識に関する研究。
- (5) プラントの環境、遠隔監視および精密診断に応じたロボットの機構（走行機構、センサの走査機構、難検箇所を検査できるアーム機構、制御機構など）に関する研究。

図1は著者らが研究開発中の点検・診断ロボットの略図（最終モデルでない）を示す。

Fig. 1 The plant inspection and diagnosis robot

本論文では、知的点検・診断ロボットの研究の第1報として、音響情報による設備の遠隔監視について検討するが、次のような限定条件を設ける。

- (1) 異常の検出は音響信号に限定する。すなわち、人間が耳で感知できる異常音響信号であれば、ロボットも感知でき、あるいはそれ以上の異常音響に対する感知能力を持たせる。
- (2) 点検・監視の目的は、正常と異常との識別に限る。
- (3) プラントにおける正常時の音響が比較的安定である。このような限定は、多くの生産プラントにおいて実現可能である。

また、音響信号だけですべての故障が感知できないが、他のセンサを用いて音響センサが感知できない故障を検出する方法について、およびロボットを故障の設備の近くに誘導する方法

と精密故障診断法などについての研究結果は次報以降で報告する予定である。

3. 故障検出のための兆候パラメータ

点検・診断ロボットは図2に示すように決まった点検ルートを巡回し、各点検ポイントで音響信号により設備の状態を監視しなければならない。なお、図2は音響による異常検出実験を行った大学のシステム実験工場の一部と各点検ポイントで測定した時系列音響信号（1.5kHzハイパスフィルタを使用）を示す。

一般に設備診断を行うときには、計測した信号から設備の状態を表す特徴（症状）を抽出し、この特徴から設備の状態を推定する。ロボット（コンピュータ）により設備の自動診断を行う場合は、その音響など信号の特徴を示す有限個の指標を計算する必要がある。このように設備の状態（正常または異常）に鋭敏に反映する指標を診断用「兆候パラメータ」という。

設備に異常が発生したとき、異常情報が含まれる信号が計測されたら、次の重要な課題はその異常情報を十分に反映できる兆候パラメータの抽出である。換言すれば、よい「兆候パラメータ」が見つければ、兆候パラメータの変化を監視すればよいから、ロボット（コンピュータ）による設備異常の検出は可能である。しかし、現在までに診断用の兆候パラメータの一般的な定義方法は報告されていない。特に本論文で検討したように、正常状態の信号が既知で、それに前もって予測できない異常信号が加わったとき、その異常信号検出用の兆候パラメータの抽出方法に関する研究報告はまだ見当たらない。

従って、診断用の兆候パラメータの抽出は、ロボットによる設備の自動点検・診断にとって不可欠である。本報では、ロボットによる設備の広域・遠隔監視法について検討するから、音響信号から設備状態が正常か異常かの判別に用いる兆候パラメータの抽出法を次のように提案する。

兆候パラメータに対して次のような考慮が必要である。

- (1) 設備の異常音から求めた兆候パラメータは、その異常を敏感に反映できるものでなければならない。
- (2) 各点検ポイントで設備状態の点検を速やかに行うために、このような兆候パラメータが音響信号から迅速に求められなければならない。

そこで、異常識別用の兆候パラメータの定義、および次報で検討する異常設備の探索のために、音響信号のパワースペクトルだけを用いる。

まず、音響センサで測定された時間波形 $y_s(t)$ に対して、単位時間に縦軸の $y_s(t)$ 、レベルを正の勾配で通過する頻度数 q_s は次式で求められる⁵⁾。

$$q_s = \frac{\sigma_s}{2\pi\sigma_x} e^{-y_s(t)^2 / 2\sigma_x^2} \quad (1)$$

$$\text{ここで、} \sigma_x^2 = \int_0^\infty P(f) df \quad (2)$$

$$\sigma_s^2 = \int_0^\infty (2\pi f)^2 P(f) df \quad (3)$$

$P(f)$ はパワースペクトルを表し、すなわち、上記の q_s はパワ

Fig. 2 Examples of sound signal measured at inspection points for detection of a faulty bearing

ースペクトルを用いて求められる。

更に、 $y_{sj}(t)$ レベルでの確率密度関数値 p_{sj} は次式で求める。

$$p_i = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_v} q_i \quad (4)$$

ここで、正常状態を s で表すと、正常状態のとき、時間波形 $y_{sj}(t)$ を N 回測定し、 $y_{sj}(t)$ の最大値($y_{sj}(t)_{\max}$)と最小値($y_{sj}(t)_{\min}$)の間に M 区間に分割し、各区間のレベル値 $y_{sj}(t)_i$ は

$$y_{sj}(t)_i = y_{sj}(t)_{\min} + i \times (y_{sj}(t)_{\max} - y_{sj}(t)_{\min}) / M \quad (5)$$

である。 $y_{sj}(t)_i$ で式(1),(4)による q_{sj} と p_{sj} の平均を求める。

$$q_{si} = \sum_{j=1}^N q_{sj} / N \quad (6)$$

$$p_{si} = \sum_{j=1}^N p_{sj} / N \quad (7)$$

さらに、正常状態において、新たに測定した時間波形 $y_{sk}(t)$ に対して、式(1)により q_{sk} を求め、正常状態 s における「相対クロス頻度情報量 I_{qsk} 」(兆候パラメータ、その1)は次のように定義する。

$$I_{qsk} = \sum_{i=1}^M |\log(q_{sik}/q_{si})| / M \quad (8)$$

同様に、正常状態 s における「相対カルバク情報量 I_{psk} 」(兆候パラメータ、その2)は次のように定義する。

$$I_{psk} = \sum_{i=1}^M |\log(p_{sik}/p_{si})| / M \quad (9)$$

診断のときに測定された未知状態 z の時間信号を $y_{zk}(t)$ とする。式(1),(4)により求めた q_{zik} 、 p_{zik} を q_{sik} 、 p_{sik} のかわりに式(8),(9)に代入して、状態 z の「相対クロス頻度情報量 I_{qzk} 」および「相対カルバク情報量 I_{psk} 」は求められる。

もし異常が発生し、しかも音響センサでその異常信号を計測できれば、式(1)と式(4)で求めた異常状態 z の q_{zik} と p_{zik} は正常状態 s の q_{sik} と p_{sik} との差が生じる。式(8)と式(9)で定義した I_q と I_p は情報量の次元を持ち、分布の距離を表すので、異常状態 z の I_{qzk} と I_{psk} は正常状態 s の I_{qsk} と I_{psk} より大きくなる。従って、式(8),(9)で定義した I_q 、 I_p は正常と異常との識別用の兆候パラメータとして用いることができる。

正常状態でも I_{qsk} と I_{psk} はランダム変数である。正常状態の I_{qsk} と I_{psk} との確率密度分布関数を求めることができる。しかし、 I_{qsk} と I_{psk} との確率密度関数、および未知状態の I_{qzk}

と I_{pzk} との確率密度関数により異常が発生したかどうかという正確な確率を求めることが困難である^{6) 7)}。

すなわち、ベイズの確率理論によれば、正常状態で測定した信号から求めた I_{qzk} と I_{pzk} の確率密度分布関数 $f(I_{qzk} | s)$ と $f(I_{pzk} | s)$ は、事後確率密度分布関数である。逆に診断のときに求めた I_{qzk} と I_{pzk} との確率密度関数が正常状態のものかどうかは、 $f(s | I_{qzk})$ と $f(s | I_{pzk})$ が次のベイズの確率式で求められるならば、正常である確率は統計検定により求められる。たとえば、 I_{qzk} について、 $f(s)$ 、 $f(z)$ をそれぞれ正常と異常との確率密度関数とすると、

$$f(s | I_{qzk}) = \frac{f(I_{qzk} | s) \cdot f(s)}{f(z)f(I_{qzk} | z) + f(s)(I_{qzk} | s)} \quad (10)$$

$$f(z | I_{qzk}) = \frac{f(I_{qzk} | z) \cdot f(z)}{f(z)f(I_{qzk} | z) + f(s)(I_{qzk} | s)} \quad (11)$$

である。しかし、上式の事前確率密度関数である $f(s)$ と $f(z)$ は現実の設備診断の分野で求めることが困難である^{6) 7)}。また、設備診断の分野では、 $f(s)$ や $f(z)$ が正確に求められなくても、ファジィ理論により求められた故障 z の可能性や異常の程度などがわかれば、設備状態点検のために十分に役立つと考える。

そこで、上式により $f(s | I_{qzk}) \propto f(I_{qzk} | s)$ の関係が成り立つから、著者らは、正常状態で求めた確率分布関数 $f(I_{qzk} | s)$ を可能性測度理論により診断用のメンバーシップ関数を決定する方法を提案する。

4. 兆候パラメータのメンバーシップ関数の作成法

ファジィ診断法により設備状態の判別を行うとき、診断用のメンバーシップ関数を必要とする⁸⁾。ファジィ診断用のメンバーシップ関数は、一般的な自動作成法が知られていない。そこで、本章では正常状態で式(8)、(9)で求めた I_{qzk} と I_{pzk} の確率密度関数から可能性測度の理論により診断用のメンバーシップ関数に変換する方法について検討する。

可能性分布関数はファジィ集合論において「全体集合 $X=\{X\}$ とすると、 X の任意要素 x が部分集合 $A \subset X$ に属する可能性を示す特性関数である」と定義される⁹⁾。可能性測度理論によれば、 I_{qzk} と I_{pzk} がどのような確率分布に従っても、その可能性分布関数を求めることができ、診断用のメンバーシップ関数は可能性分布関数に基づいて作成可能である。一般に実験データから I_{qzk} と I_{pzk} との確率密度関数を求めて、式(12)により可能性分布関数を求める。例えば、 I_{qzk} と I_{pzk} が正規分布に従う場合、 N 段の可能性分布関数の値 $p(x_i)$ は正規分布の確率密度関数を用いて次のように求める⁹⁾。

$$p(x_i) = \sum_{k=1}^N \min \{ \lambda_i, \lambda_k \} \quad (12)$$

$$\text{ここで、} \lambda_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-x^2} p \left\{ -\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2} \right\} dx$$

$$\lambda_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-x^2} p \left\{ -\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2} \right\} dx$$

Fig. 3 Example of possibility distribution function

但し、上式中、 $x=I_{qzk}$ or I_{pzk} 、 $X_i = X_{\min} + i \times (X_{\max} - X_{\min}) / N$ 、 $i=1 \sim N$ 、 σ は x の標準偏差、 $\bar{x}$ は x の平均値である。図3は確率密度関数を可能性分布関数に変換する例を示す。

図4の太い実線は可能性分布関数に基づいて作成された正常状態の可能性判別用の I_{qzk} と I_{pzk} メンバーシップ関数例である。この例のようにある傾向がわかればそれに基づいて可能性分布関数を補正することによりメンバーシップ関数が作成できる。従って、メンバーシップ関数の作成手順は次のようになる。

確率密度関数 → 可能性分布関数
→ メンバーシップ関数 → 応用・改善

正常状態の I_{qzk} と I_{pzk} とのメンバーシップ関数の集合を

$$\Pi_s = \{ \mu_{I_{qzk}}(x), \mu_{I_{pzk}}(x) \} \quad (13)$$

とする。実際に診断のときに求めた I_{qzk} と I_{pzk} のメンバーシップ関数を

$$\Pi_z = \{ \mu_{I_{qzk}}(x), \mu_{I_{pzk}}(x) \} \quad (14)$$

とすると、両方の類似度は次のように求める。

$$w_{sz} = \min \{ \max [\mu_{I_{qzk}}(x) \wedge \mu_{I_{qzk}}(x), \max [\mu_{I_{pzk}}(x) \wedge \mu_{I_{pzk}}(x)] \} \} \quad (15)$$

もし、 w_{sz} はある与えられたしきい値より小さければ、何らかの異常が発生したと判断する。このしきい値は、あくまで人為的に与えるものであり、現場の状況に応じて決められる。著者らは、経験的に言えば、正常の可能性は0.6より小さければ、何らかの異常発生兆候が現れ、要注意だと考える。例えば、図4には軸受の外輪に傷があるとき、点検ポイント①で測定された $\Pi_z = \{ \mu_{I_{qzk}}(x), \mu_{I_{pzk}}(x) \}$ と $\Pi_s = \{ \mu_{I_{qzk}}(x), \mu_{I_{pzk}}(x) \}$ との類似度が次のように求める。

$$w_{sz} = \min \{ 0.55, 0.75 \} = 0.55 < 0.6 \quad (16)$$

ここで、 $w_{sz} < 0.6$ であるので、異常の発生が判別された。

また、図4は他の軸受故障（内輪傷、転動体傷）時のメンバーシップ関数の例も示している。これらのメンバーシップ関数は、 Π_s との類似度がすべて0.6より小さいので、異常と見なす。

Fig. 4 Example of fault detection by the membership function of I_q and I_p

図4に示すように、点検・診断ロボットは決めた点検ルートで巡回点検し、それぞれの点検ポイントで、指向性マイクを用いて、 45° 間隔で8方向の I_{qsk} と I_{psk} のメンバーシップ関数を作成しておく。なお、図中の I_q 、 I_p は、式(8)、(9)で求めた I_{qzk} 、 I_{pzk} 、 I_{qsk} 、 I_{psk} を意味する。点検中に音響信号を測定し、求めた I_{qzk} と I_{pzk} の可能性分布関数を I_{qsk} と I_{psk} のメンバーシップ関数とマッチングし、式(15)で w_{sz} を求めて、設備の状態を監視する。

更に、ある点検ポイントで異常を検知した後、どの設備が故障したか、その設備のどの部分が故障したか、どのような故障種類が起こったかを精密に診断するために、ロボットを異常信号に基づいて故障の設備の近くまで誘導する必要がある。ロボットの誘導法については、次の論文で検討する。

5. 結 言

本論文では、生産プラントの点検・診断ロボットの基本機能と構造について検討し、音響で設備の状態を監視するために「相対クロス頻度情報量」と「相対カルバク情報量」による兆候パラメータの定義、そのメンバーシップ関数の作成法、および異常検出法を提案した。また、実際の実験によりこれらの方法の有効性を確認した。

今後は、更に音響情報で検出できるプラント異常種類と感度についての調査や他のセンサ(嗅覚センサや赤外線センサなど)

によるプラント状態の遠隔・広域監視の研究を行っていく。

参 考 文 献

- 1) 辰野恭市：保守点検ロボットの現状と自律化，電気学会誌，113，6，(1993) 443.
- 2) 佐藤眞理：極限作業ロボット，化学工業，48，7，(1984) 571.
- 3) 吉田富治ほか：原子力発電用ロボット，原子力工業，39，4，(1993) 8.
- 4) 中山良一ほか：原子力プラント用ロボット，東芝レビュー，48，4，(1988) 339.
- 5) J.S.Bendat: Probability Function for Random processes, NASA Rep. CR-33,(1969).
- 6) 豊田利夫：設備診断技術研究の現況，計測と制御，27，6，(1988) 477.
- 7) 松山久義：診断アルゴリズム，精密工学会誌，57，3，(1991) 433.
- 8) 日本ファジィ学会編：ファジィ医療診断，日刊工業新聞社，(1994).
- 9) D.Dubois & H.Prade: Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing, Plenum Press, N.Y., (1988).