

AI を活用した知的設備診断技術の最新動向

陳山 鵬

三重大学大学院 生物資源学研究科 共生環境学専攻

製造業のIoT化の実現には、設備の重大なトラブルや事故を未然に防止するスマート設備診断技術が欠かせない。スマート設備診断技術は知的設備診断技術とも言い、AI技術を活かして、設備異常を自動的に早期に検出し、異常種別を自動的に判明する技術である。本稿では、最近、産学連携で開発したスマート設備状態監視・診断システムにおける自動信号検査、自動フィルター、自動簡易・精密診断機能および今後さらに高度な知能を有するシステムへの発展について紹介する。

1. はじめに

年、インダストリー4.0やIoTの技術革新が次々と勃興されており、第4次産業革命とも言われる時代が既に到来している。IoTやインダストリー4.0などによる生産設備・交通運輸機器などの高速化、知能化、無人化および複雑化の進展に伴って、スマート設備診断技術は、設備の重大なトラブルや事故を未然に防止して安全・安心を確保するために必須な技術として益々注目される。スマート設備診断技術は知的設備診断技術とも言い、AI技術や設備診断工学を活かして、設備異常を自動的かつ早期に検出し、異常種別を自動的に判明する技術である。

設備診断には図1に示すような要素技術が必要である¹⁾。本報では、最近、長年にわたりこれら要素技術について研究した成果およびAI技術を活かして、産学連携で開発したスマート設備状態監視・診断システム(McDr)における各新機能(自動信号

検査、自動フィルタ、自動簡易・精密診断機能など)およびさらに高度な知能を有するシステムへの発展について紹介する。

2. オンライン・スマート設備状態監視・診断システム (McDr-A)

オンライン・スマート設備状態監視・診断システム(McDr-A)の特徴は以下の通りである。

- (1) 3方向の振動信号、4周波数帯域(最大解析周波数: 50kHz)による高精度な状態監視・診断
- (2) 計測した信号の良否の自動検査(信号計測部の異常検出、誤診の防止、特許5017678)
- (3) 統計情報フィルタ²⁾による異常信号の自動抽出(異常の早期検出、強ノイズ時にも高精度な診断)
- (4) 厳選した複数特徴パラメータ³⁾⁴⁾による設備状態の網羅的な反映(時間・周波数領域のヒストグラム解析による状態識別法⁵⁾(特開2018-205292)も導入されている)
- (5) 自動状態判定(正常, 異常, 注意, 危険の自動判定)
- (6) マルチ・コンディション・モニタ(MCM)による高効率な設備状態監視・管理(特許6085862)
- (7) AI技術による自動精密診断(軸受異常, 構造系異常の自動判別, 特願2017-248423)
- (8) 豊富な解析機能を有するPCソフトウェアによ



図1 設備診断の要素技術

ディープラーニングによる設備診断システムの インテリジェント・グロース(Intellectual growth:知的成長)

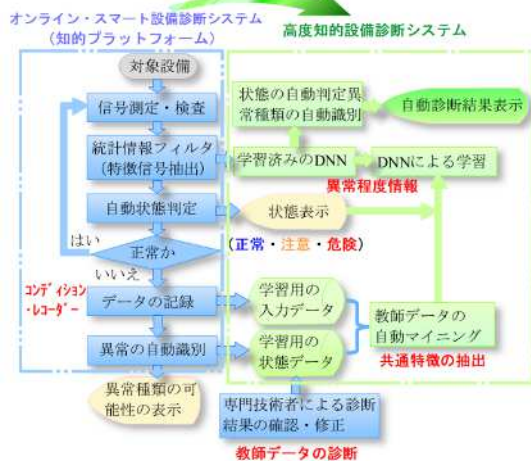


図2 McDr-Aの処理流れおよび今後の発展

る精密診断・余寿命予測

(9) 状態診断結果報告書の随時出力による状態の傾向管理

(10) 収集したデータを用いて、ディープラーニングによる自動学習・自動診断(インテリジェント・グロース:知的成長, 構築中)

McDr-Aの処理の流れおよび今後の発展を図2に示す。以下, McDr-Aの主要な新機能について説明する。

2.1 診断のために計測した信号の良否の自動検査 (不備な信号の自動検出, 特許5017678)

設備診断のために信号(振動, 電流, 音響など)を計測するとき, 計測装置やセンサの異常, 測定ミスや外乱などの原因により計測された信号が不備な信号となることがある。不備な信号を用いた場合, 当然ながら正確な診断結果が得られない。

McDr-Aは不備な信号を自動的に検出して誤診断を防ぐ。

2.2 マルチ・コンディション・モニタ (MCM)

図3に示すように, マルチ・コンディション・モニタ(MCM)は, 各測定ポイントにおける多方向(たとえば, x, y, z方向)の診断結果(状態)および信号良否の検査結果を色で表し, 数多くの状態監視対象(あるいは, 計測ポイント)の情報登録, 状態・情報の表示などを一つのモニタ画面(ディスプレイ)上にまとめられ, 各状態監視対象(あるいは, 計測ポイント)の管理・状態監視・診断を効率的かつ容易に行えるものである。



図3 マルチ・コンディション・モニタ (MCM)

2.3 統計情報フィルタによる異常信号の自動抽出

設備診断の時に測定した信号の中には様々なノイズが存在し, ノイズの影響によって異常の発見遅れか発見不能になる場合がある。すなわち, ノイズをよく除去すれば, 早期異常でも感度・精度よく検出・識別できるため, McDr-Aでは, 情報工学や確率統計学などの手法を用いて考案した実用的な統計情報フィルタ²⁾を導入してノイズを自動的にかつ有効的に除去する。

図4は統計情報フィルタにより低速軸受の振動信号から微小な異常信号抽出(ノイズ除去)の例を示す。この例では, 従来のハイパスフィルタによる微小な異常信号抽出(ノイズ除去)が困難であるが, 統計情報フィルタにより微小な異常信号を自動的に抽出すること(ノイズ除去)ができ, 異常種類を精密に判別できたことを示す。

2.4 最新設備診断技術による自動簡易診断

(正常, 異常, 注意, 危険の自動判定)

様々な設備の状態を網羅的に反映し, あらゆる異常状態を感度よく検出するために, 厳選した有次元・無次元特徴パラメータ³⁾に加えて, 最新の研究成果である時間領域・周波数領域のヒストグラムの特徴解析による状態識別法(特開2018-205292)⁵⁾も McDr-Aに導入された。特に軸受診断のために, 既に有効であることが証明されている衝撃度(γ)⁶⁾が導入されており, 軸受異常を高精度・高感度に検出できる。また, 状態判定基準が自動的に作成され, 状態判定(正常, 異常, 注意, 危険)も自動的に行う。

2.5 自動精密診断機能

自動簡易診断で異常が検出された後, 異常種類を判別するための自動精密診断が行われる。図5に示すように, 軸受異常(外輪傷, 内輪傷, 転動体傷)の自動精密診断に軸受異常時のパス周波数成分比

(SPFx)⁷⁾を用い、図6に示すように、構造系異常(アンバランス、ミスアライメント、緩み)の自動精密診断に回転周波数成分比(SPTFx)⁸⁾を用いるが、ノイズの影響や異常種類間の連成影響などにより単

にSPFxとSPTFxだけで正確に異常種類の判別ができないので、スペクトルの適応処理や他の特徴パラメータとの総合判定も必要である。

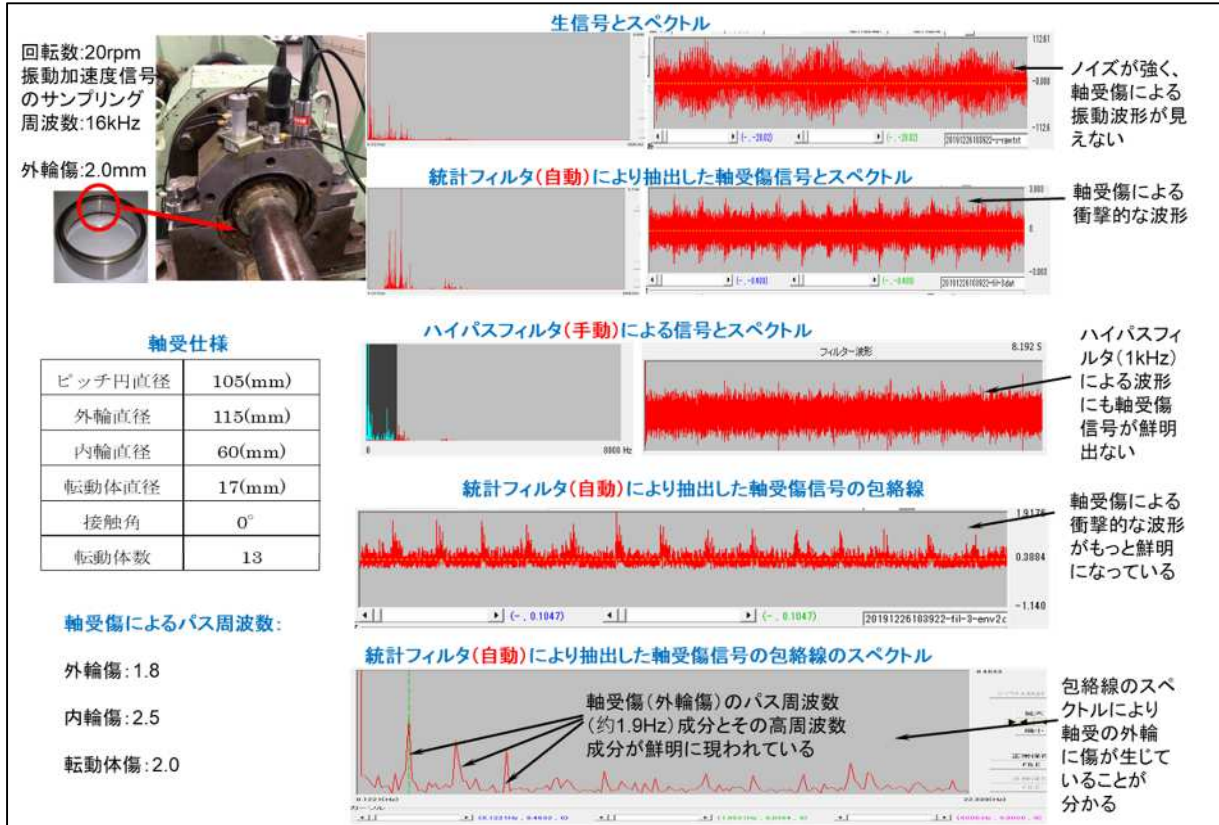


図4 統計情報フィルタによる低速軸受の異常信号抽出(自動ノイズ除去機能)の例

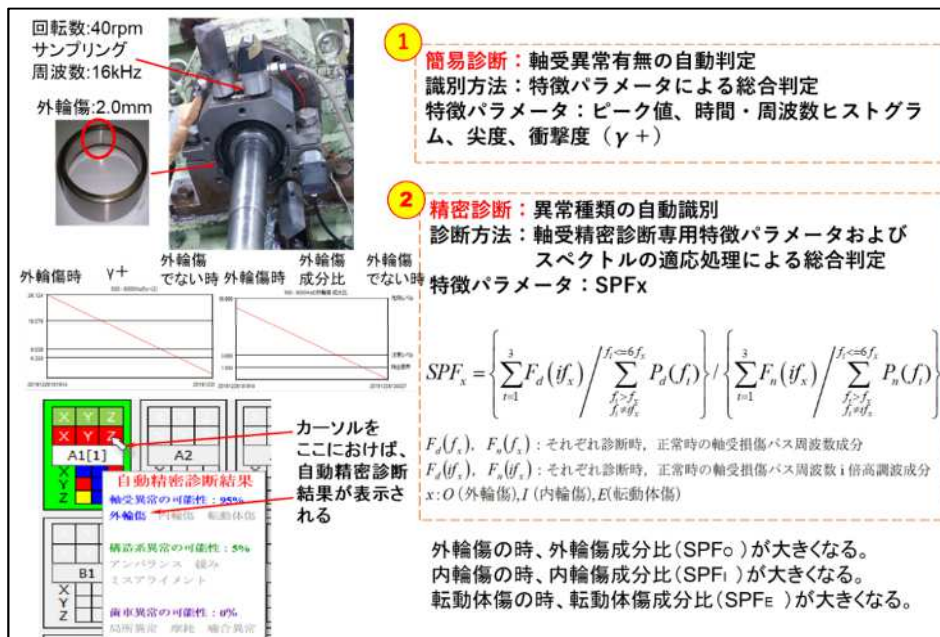


図5 軸受異常の自動認識

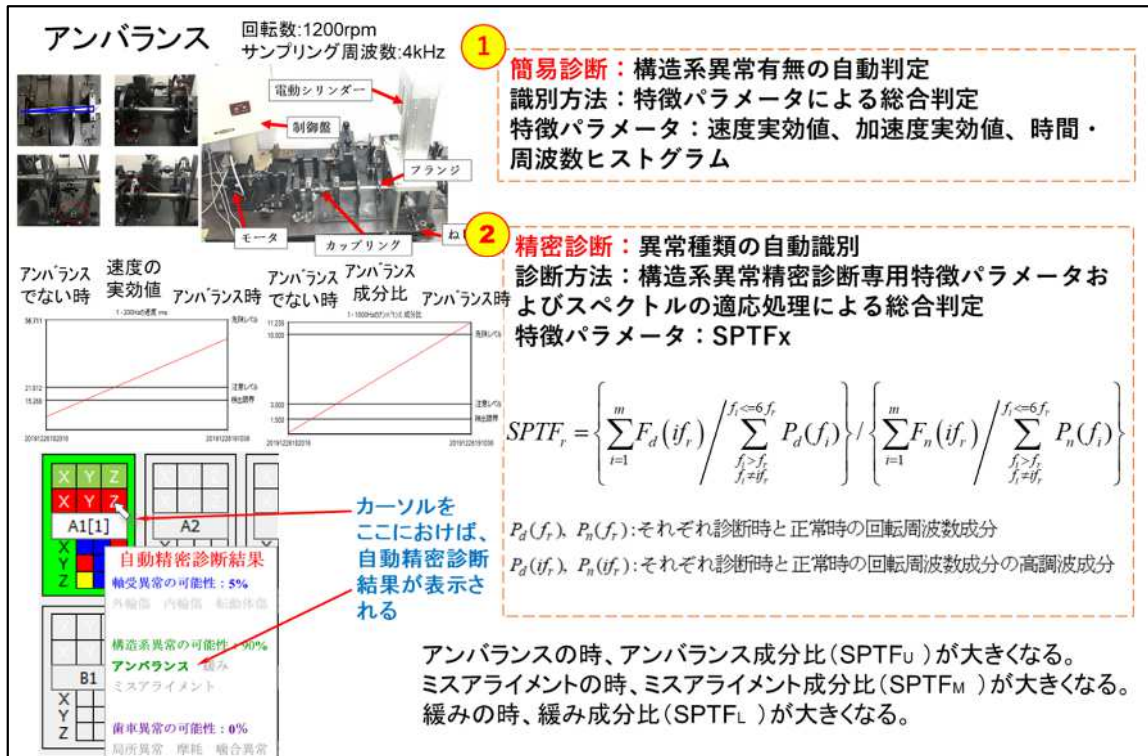


図6 構造系異常の自動識別

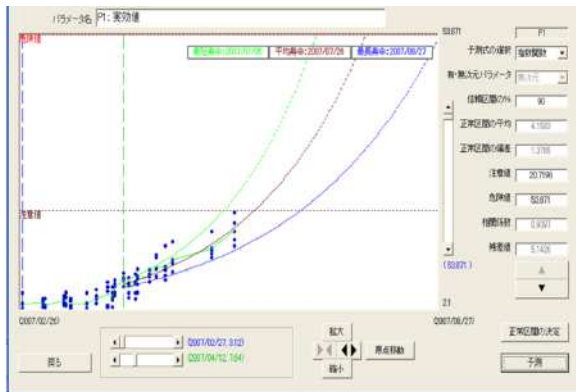


図7 最短・平均・最長余寿命予測の例

2.6 豊富な解析機能を有するソフトウェアによる精密診断

McDr-A は、精密診断ソフトウェア (DET001)¹⁾ を用いて、計測信号解析や精密診断を行うこともできる。DET001 の主な特徴は以下の通りである。

- (1) スペクトル解析の詳細・多様・便利な機能
- (2) 異常信号を抽出するためのマルチバンド・フィルタリング機能および自動フィルタリング機能
- (3) 計画保全を支援するための傾向管理・寿命予測機能 (図7)
- (4) 状態判定に有効な特徴パラメータの抽出機能
- (5) 特徴パラメータによる状態判定・総合診断機能

- (6) 歯車・軸受の精密診断用のパラメータ (パス周波数や共振周波数) の計算機能
- (7) カスケード解析やリサージュ分析などの解析ツールが充実
- (8) 軸受の精密診断機能
- (9) ロータの1・2面バランス機能

2.7 状態診断結果報告書による状態の傾向管理

マルチ・コンディション・モニタ (MCM) の「設備状態アイコン」をクリックすると、診断報告書が出力される。診断報告書には設備仕様、各特徴パラメータの傾向グラフ、絶対・相対判定基準、各周波数帯域の特徴パラメータの値、状態判定結果、特徴パラメータの傾向図などが含まれている。

2.8 知的設備診断システムの難点と高度知能化への対策

最近、AI 技術、特に深層学習 (ディープラーニング) により様々な分野におけるシステムの知能化が進められている。知的システムを設備診断に応用して知的設備診断システムを構築する場合、次のような難点がある。

- (1) 実用性：学習用の現場データ (各種異常状態のデータ) の獲得が困難である。

(2) 汎用性：現場設備の運転条件が複雑で個性が強いため、ある設備で構築した知的診断システムは他の設備に適用しにくい。

(3) 精密性：異常種類・程度が多く、特徴も様々なので、全ての異常種類を精密に識別することが困難である。

たとえば、近年、ディープラーニングによる顔や画像の自動認識が広く実用化されているが、生産現場の設備異常を自動的に識別するための診断装置例が殆どない。その理由を簡単に説明すると、設備異常信号の特徴が顔や画像より遥かに複雑であるためである。

最近、遷移学習法(Transfer learning)も提案され、深層学習の汎用性を高めるアプローチを試みているが、まだ有効で実用化できるレベルに至っていない。上記の難点を克服するために、以下のような方策が考えられる。

(1) 共通な特徴や発生メカニズムが理論的に解明できる異常状態(例えば、軸受異常、回転軸構造系異常、歯車異常など)では、AI と知識工学を活かした自動診断の実現が可能である。

(2) 設備診断システムに「エキスパート・アドバイス・システム(専門家助言機能)」を導入して、知的設備診断システムを有効に応用しながら、設備診断知識データも蓄積して知的診断レベルを高めていく。

(3) 現場で各状態の学習用のデータを迅速、適時に収集できる「インテリジェント・コンディション・レコーダ(知的状態診断記録機能)」で設備状態を監視しながら、各状態データを適時に記録する。

(4) 現場で蓄積したビッグデータは必ずしも知的診断システムの構築にとってグッドデータとは限らないので、ビッグデータから各異常種類の共通特徴を理論解析やAI技術による抽出で、ビッグ・グッド・データにして、知的診断方法の汎用性を高める。

図2に示すように、現段階では、ディープラーニングにより高度知能化の設備診断システムを構築することが困難であるが、現在の診断システム(McDr-A)が設備安全のために十分な状態監視・診断の性能をもち、この状態監視・診断システムを有効に運用しながら、さらに現場データが蓄積された時に、次のように高度な知能化システムへ発展させる。

- (1) 状態変化時のデータを適時に記録する。
- (2) データの有効性を自動的に診断して、有効なデ

ータであれば、教師データとする。

(3) データの自動マイニングにより教師データ(学習用のデータ)から状態を反映する共通な特徴を自動的に抽出する。

(4) 抽出した特徴を学習に用いる。

(5) 自動診断機能を強化していく。

また、更に高精度な寿命予測に関する研究も進めている⁹⁾。

このような仕組みは「インテレクチュアル・グロース：知的成長」と定義する。

3. ポータブル・スマート設備状態監視・診断システム (McDr-B)

重要な設備に対して、状態監視すべき箇所が多くあるが、全ての箇所にセンサを常置してオンライン状態監視することは、高コストだけでなく、複雑な配線や計装が現場作業(設備操作やメンテナンス)の

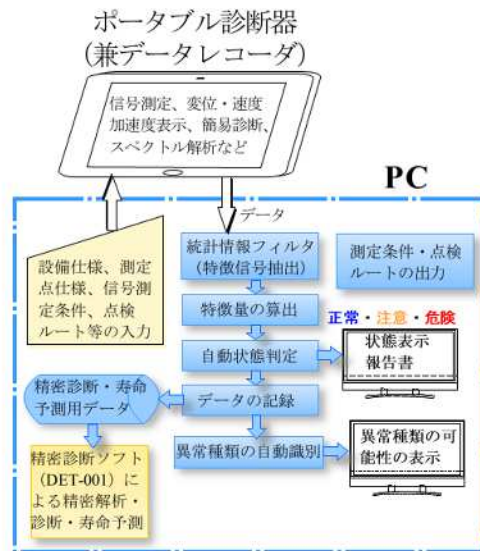


図8 McDr-Bの処理流れ



図9 McDr-Bの構成

邪魔になり、計測システムの不具合も発生しやすい。よって、特にオンライン状態監視が必要な箇所にセンサを常置して常時に状態監視・診断するが、他の箇所はポータブル診断器で定期的、あるいは随時に診断すればよい。

現場で設備診断の専門知識を持たない設備操作者も簡単に使用できる、「ポータブル・スマート設備状態監視・診断システム (McDr-B)」を開発した。McDr-B は、図 8、図 9 に示すように、ポータブル診断器と PC ソフトから構成され、主な診断方法と処理の流れが上記のオンライン・スマート設備状態監視・診断システム (McDr-A) とほぼ同じである。

4. まとめ

これまでに、設備安全のために十分な状態監視・診断の性能をもつ診断システム (McDr-A, McDr-B) を開発し、これらの状態監視・診断システムを有効に運用しながら、今後、次のような高度化を進めていく予定である。

- (1) 本文にも言及した診断装置システムの高度知能化の実現、すなわち、人工知能 (AI) 技術を生かした全自動診断の実現
- (2) 高精度な余寿命予測技術の確立⁹⁾
- (3) 振動信号、AE 信号、音響信号、電流信号などの複数情報融合により診断精度を高める技術
- (4) 可変運転条件設備 (回転数や負荷が変動する設備) の高精度な診断技術

参考文献

- 1) 陳山 鵬 : 回転機械設備診断の基礎と応用, DET LLP 出版, 2015.
- 2) P. CHEN and T. TOYOTA: Extraction Method of Failure Signal by Genetic Algorithm and the Application to Inspection and Diagnosis Robot, IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science VOL.E78-A, No.12, pp.1622-1626, 1995
- 3) 陳山 鵬, 三笥哲郎, 里永憲昭, 豊田利夫 : 時間領域の有・無次元特徴パラメータの統合による回転機械設備の状態診断法, 日本設備管理学会誌, Vol.19, No.2, pp.56-65, 2007
- 4) 陳山鵬 : 機械設備の異常検知と状態判定基準について, 信頼性学会誌, Vol.37, No.3, pp.104-110, 2015
- 5) 宋瀏陽, 陳山鵬, 王華慶 : 時間領域および周波数

領域のヒストグラムの特徴解析による設備状態監視・診断法, 第 16 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, pp.11-16, 2017

6) 陳山鵬 : 軸受の損傷による回転機械の振動事例と診断方法, トライボロジスト (日本トライボロジー学会), Vol.61, No.7, pp.431-436, 2016

7) 小林 祐介, 富田 優, 宋 瀏陽, 陳山 鵬 : 異常軸受から離れた場所での自動診断, 日本設備管理学会誌, Vol.31, No.1, pp.14-22 (2019)

8) 薛紅涛, 陳山鵬 : 時間領域の特徴パラメータとサポートベクターマシンによる設備診断法-回転機械の構造系異常診断への応用-, 保全学 (日本保全学会誌), Vol.10, No.3, pp.51-57, 2011

9) 金森, 陳山ら : 回転機械設備の状態予測法について (1) 第 6 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, No.07-28, pp.119-122, 2007