



学位論文審査の結果の要旨

専攻	共生環境学専攻	氏名	唐海紅 (Tang Haihong)
審査委員	主査	陳山 鵬 教授	
	副査	村上 克介 教授	
	副査	王 秀崙 教授	
	副査	森尾 吉成 教授	
	副査	福島 崇志 准教授	
論文題目 (題目変更の有無) 無	Deep Learning Based Intelligent Diagnosis Methods for Rotating Machinery Using Vibration Signal - Approach by Signal Preprocessed SAE and Improved CNN - (ディープラーニングと振動信号に基づく知的回転機械診断法 — SP-SAEとI-CNNによるアプローチ —)		
(論文審査の結果の要旨)			
<p>学位申請者・唐海紅 (Tang Haihong)氏は博士後期課程において、工業・農業生産設備の安全・安心に関わるスマート設備診断技術に関して基礎・応用研究を行い、その研究内容と成果は次のようにまとめられる。</p> <p>「安全と安心」及び「自然環境を考慮した持続可能な経済発展」が人類にとって重要な共通課題であることは言うまでもなく、人類は生活や社会活動に欠かせない生産設備などの人工物や人工システムの安全性を確保する必要がある。回転機械は農業生産、工業生産に最も多く使用される設備であり、その重大なトラブルや事故は経済的や人的な被害だけでなく、時には環境にも悪影響をもたらす。スマート設備診断技術は、情報工学などの手法を用いて設備状態を自動的に監視・診断する技術であり、今後、生産設備の大型化、高速化、知能化、無人化および複雑化の進行に伴って、生産設備の重大なトラブルや事故を未然に防止する重要な技術としてますます注目される。</p> <p>本論文は、回転機械の異常を早期に発見し、異常種類を早期に判明するために、ディープラーニングと振動信号による回転機械設備のスマート状態診断法に関する研究成果をまとめたものであり、その内容を要約すると次の通りである。</p>			
<p>(1) すべり軸受を含む回転軸系 (以下、すべり軸受系と略称) は高速回転機械によく用いられる重要な部分である。現場で滑り軸受系の異常を検出するために測定した振動信号のSNR (信号対雑音比) が低いため、従来の方法では高精度の診断結果を得ることが困難である。そのために、ディープラーニング (Stacked autoencoder : SAE) と統計フィルタに基づく逐次的な診断法が提案された。まず、統計フィルタによりSNRを向上するための自動的な雑音除去を行い、次に、SAEを用いて滑り軸受系の状態の特徴を逐次的に抽出・学習し、各異常状態を自動的かつ精密に識別することができた。提案した方法を他の方</p>			

法と比較した結果、本方法は最も高精度にすべり軸受系の異常を検出・識別できることを示した。

- (2) 低速（100rpm以下）軸受の状態診断では、診断のために計測した振動信号のSNRが中・高速回転軸受診断時の信号に比べ低いので、異常検出が困難である。そのために、改良モード分解法（IEMD）、グラミアン・アンギュラー・サンメーション・フィールド（GASF）および畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を組み合わせることにより低速軸受状態を自動的に識別する方法を提案した。提案した方法の有効性を検証するために、低速回転機械の正常状態と軸受異常状態において測定した、強いノイズを含む振動信号を用いて、診断精度と汎用性について評価した結果、本方法は従来の機械学習法に基づく自動診断法より優れていることを示した。また、本方法の高い診断精度の原因を分析して、さまざまな運転条件に対応できる適応型分類・診断器のために最適なシステム係数の構成も検討・決定した。
- (3) 深層学習法による設備診断の汎用性を高めるために、ロバスト主成分分析（RPCA）とマルチカーネル・ディープ・ニューラル・ネットワーク（MDNN）という新しい自動診断法が提案された。まず、RPCAを用いて診断信号から微弱な異常信号を抽出し、次に、MDNNを用いて抽出した異常信号の特徴を適応的に学習・抽出し、異常信号に含まれる非線形性に対してもロバスト性をもつため、異常検出・識別の汎用性を高めることができた。提案した方法は、回転機械実験装置で測定した微小な軸受傷信号とインターネット上で公開されている診断データを用いて検証した結果、従来の機械学習や伝統的な深層学習方法より優れることがわかった。さらに、深層学習におけるネットワークの中間層に隠された情報を可視化して、その高性能の原因も分析した。
- (4) 振動信号は測定することが容易なので、現場で回転機械診断に広く用いられているが、現場では、振動信号の計測が困難な場合、電流信号を用いて状態監視・診断を行っている。畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を利用して、振動信号と電流信号による回転機械診断の比較実験を行い、両者の特徴と利点・欠点を明らかにした。比較評価の結果、振動信号は構造系異常においても衝撃系異常においても電流信号より診断性能が優れていることがわかったが、ノイズをよく除去してCNNのパラメータを適切に調整すれば、電流信号も比較的高い診断精度をもつことも示した。

以上のように、本研究は、信号処理や人工知能などの手法を用いて回転機械設備の状態監視・診断における諸問題を解決することにより工業・農業生産プラントの生産設備の安全かつ安定運転に貢献したものである。研究成果の主要部分をまとめた学術論文（6編）は筆頭著者として、査読制度が確立されている学術雑誌（IEEE TIM（IF= 3.658）、IEEE ASME（IF= 5.673）、Applied Science-Basel（IF=2.458）、日本設備管理学会誌など）に投稿・掲載されている。学位審査委員会は、唐海紅 (Tang Haihong) 氏の学位申請論文に対して学術的価値、オリジナリティ、実際問題との関わりの3点から評価した結果、全員一致で博士学位論文として価値があるものと認めた。