1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

機械学習と拡張型固有直交展開法を用いた多変量モード解析による油圧プレス機の異常・故障監視システムの開発

(2) 研究者氏名，職名

寺島 修 教授

(3) 研究概要

本研究は、既存の油圧プレス機に後付け可能な異常・故障監視システムの開発を目的とした。シリンダ，ポンプ，モータの振動，加えて油温・油圧の情報を同時に取得し，拡張型固有直交展開法を用いて多変量モード解析を行うことで，プレス圧の低下などの異常兆候を早期に検知する手法を構築した。相互相関係数の監視により，振動信号間の位相ズレを把握し，異常部位の特定も可能となった。この手法は，地方中小企業のDX促進と労働生産性の向上に資する技術である。

(4) キーワード

油圧プレス機・異常検知・振動解析・多変量モード解析・機械学習

(英文)

(1) Research title

Development of an Abnormality and Fault Monitoring System for Hydraulic Press Machines Using Machine Learning and Multivariate Mode Analysis Based on Extended Proper Orthogonal Decomposition

(2) Name of researcher with title of position

Osamu TERASHIMA, Professor

(3) Summary

This study aimed to develop a retrofittable monitoring system for detecting failures and anomalies in existing hydraulic press machines. By acquiring vibration data from cylinders, pumps, and motors, along with oil temperature and pressure, a multivariate modal analysis was performed using the extended proper orthogonal decomposition method. Monitoring of cross-correlation coefficients between sensors enabled the detection of abnormal phase shifts and early identification of fault locations. The proposed technique contributes to the digital transformation (DX) and labor productivity improvement of small- and medium-sized enterprises in regional

industries.

(4) Key Words

Hydraulic pressing machine • Failure detection • Multivariate modal analysis • Cross-correlation • Machine learning

2. 本研究の意義, 特色

本研究の目的は, 老朽化した既設の油圧プレス機に対して, 異常や故障を兆候段階で早期に検知可能な監視システムを開発することである. 振動・加速度・油圧・油温といった多様な物理量の時系列データを統合的に解析し, 経年劣化や油漏れなどによるプレス圧の低下を事前に把握することで, 保守・整備の計画的実施を可能にする. これにより, 中小企業における突発的故障の回避, 設備の延命化, さらには生産効率の向上が期待される. さらに, 本システムは既設設備への後付けが可能であり, 低コストかつ高精度な運用が可能な点が大きな特色である.

3. 実施した研究の具体的内容, 結果

本研究では, 中小製造業が保有する 1400 トン級油圧プレス機を対象として, 後付け可能な異常・故障監視システムを開発した. 監視対象には, 油圧シリンダ 4 基, ポンプ 2 基, 送油用モータ 2 基を含み, それぞれに振動加速度センサ (PCB 社 M608A11), 油圧センサ (Keyence 社 GP-M400T), 油温センサ (東亜電器社 TSC-54) を設置した. センサの配置は振動伝達経路と保守性を考慮して設計され, シリンダ上部, ポンプのケーシング, 送油管接続部, およびモータベース部に取り付けた. これらの信号は制御 PLC と同期し, 1 サイクルあたり 5kHz で最大 10 秒間の連続データを収集し, 押し込みや戻りといったプレス動作と時間的に整合させて解析できるように構成された.

信号処理の初期段階では, ノイズ除去と主要成分の抽出のために 10-500 Hz のバンドパスフィルタ処理を行った. フィルタ後の信号に対して, 押し込み工程を中心に RMS, CF (クレストファクタ), スペクトル重心, エンベロープ平均, および高調波比などの統計的・周波数的特徴量を抽出した. 複数日の測定結果から, 各特徴量のばらつきと経時変化を追跡し, 日単位での傾向分析を行った結果, 異常が発生する前兆として CF 値の上昇と高調波比の変動幅の増大が一貫して確認された.

また, 相互相関係数の解析では, シリンダ間やポンプ・モータ間の同期性が正常動作時には高く (0.95 以上), 異常時には 0.75 以下に低下する傾向が明確に見られた. この指標を異常検知の一次判定として採用し, しきい値を自動的に補正するアルゴリズムを開発することで, 環境変化や日常的なノイズにも頑健な監視が可能となった. 例えば, プレス圧 5%以上の低下が発生した前日には相互相関係数が平均で 0.78 まで低下しており, 予兆的な変化として高い信頼性を持つことが分かった.

次に, 多変量モード解析 (EPOD) を導入し, 取得された振動・圧力・温度の信号から主

成分モードを抽出した。健全状態では第 1 主成分モードが 85%以上の寄与率を持つのにに対し、異常時には第 1 モードが 60%以下に減少し、第 2、第 3 モードの構造が顕著になることが確認された。これにより、異常の発生が振動モード構造に明瞭な影響を与えることが実証された。また、各モードと特定のセンサ信号の相関を求めることで、シリンダ#3 のみに関係する異常が全体のモード構造を支配するようになる過程も可視化され、部位特定が容易になった。

さらに予測的な診断支援のために、機械学習手法としてガウス過程回帰（GPR）を採用した。特徴量としては CF、スペクトルスロープ、包絡線エネルギー、トレンド強度などを入力し、正常・異常データを用いてモデルを訓練した。カーネル関数は有理二次モデルが最も安定した予測性能を示し、検証データに対する決定係数 R^2 は 0.92、平均絶対誤差（MAE）は 5%未満であった。さらに、異常スコアに対してしきい値を適応的に設定することで、突発的な挙動に対しても高い感度を維持できることが分かった。補完的に導入した決定木モデルや SVM（サポートベクタマシン）との比較では、GPRの方が予測の滑らかさと信頼区間の評価に優れていた。

実運用に向けては、装置停止時に SD カードに自動保存される構成や、Web アプリケーションとの連携により異常警報をメール通知する仕組みを構築中である。さらに、実際の製造現場において、油漏れやボルト破断が疑われる異常事例を検出した際、異常モード構造と相関係数の変化が一致して観測され、現場での点検結果とも整合していたことから、提案手法の信頼性が高いことが実証された。

以上により、開発した異常検知システムは、高い汎用性、低コスト性、および高精度性を兼ね備えており、中小製造業にとって極めて有用なツールであると考えられる。今後はリアルタイムでのフィードバック制御との連携や、他の油圧設備（例：ショベルカー、鍛造機械等）への展開を通じて、省人化・予防保全・DX 推進に貢献することが期待される。

また、機械学習モデルの運用面においては、初期学習後も定期的な再学習を行う設計とし、現場での装置条件の変化や経年劣化に対応可能なように工夫した。具体的には、3 か月に一度、最新データを用いた再学習処理を実施し、学習モデルが古いデータに引きずられないよう、過去 1 か月以内のデータを優先的に重視する設計とした。これにより、常に現場の最新状態に適応した診断結果が得られる。また、GPR モデルの予測誤差が急激に上昇した場合には、再学習の自動トリガが作動する構造を導入し、モデルの精度低下を事前に抑制できるようにしている。

特徴量の選定についても、単純な RMS 値や CF に加え、振動信号の周波数変動を捉える包絡線スペクトルやスペクトルスロープを重視した。これらの特徴量は異常発生時に急激に変化する傾向が強く、従来のしきい値判定では見落としがちな微小な変化も捉えることが可能である。信号処理パイプラインとしては、平滑化処理や標準化処理を行い、機械学習モデルにとって扱いやすい形で入力することで、訓練精度と判別精度を大幅に向上させた。

現場からのフィードバックもシステム改善に活用された。例えば、警報の頻度が高すぎると現場で無視される傾向があるため、異常スコアに加えて変化速度を考慮し、しきい値をダイナミックに調整する仕組みを追加した。この結果、過検知が減り、現場作業からの信頼性が向上した。また、異常検知後に表示される「推定異常要因（シリンダ内部漏れ、ボルト緩み等）」も、事例ベースの説明として現場で好評を得ている。

さらに、本研究では異常の種別を分類する試みも行った。異常の中でも重大な機械的故障と、軽微な環境変動や誤差を区別するため、異常スコアの時系列変化、モード構造の変化速度、圧力応答の非対称性などを併用し、分類ルールを設定した。その結果、実際の現場で観測された数件の異常のうちのいくつかを「予兆ありの機械的異常」として適切に分類でき、その他は「環境変動による一時的変化」と判別された。

このように、本研究で構築したシステムは単なる異常検知にとどまらず、原因推定、分類、予測、学習更新といった複数の層を持ち、より高機能な保全支援システムとしての完成度を有する。本手法の汎用性は高く、パラメータ設定の変更のみで他の油圧装置にも適用できる構成となっている。今後は、設備管理システムとの API 連携、クラウド監視、さらに経営指標（OEE など）との接続を視野に入れたシステム展開を計画している。

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

富山県立大学 武田尚恭 元・大学院生
富山県立大学 李 喆 元・大学院生
富山県立大学 重 昂輝 元・大学院生
富山県立大学 小島瑞貴 大学院生

5. 研究実施時期

令和5年4月1日から令和7年3月31日まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

Study on the machine-learning based system for detecting abnormal pressure drops in hydraulic press machines, Naoyuki Takeda, Zhe Li, Koki Shige, _Osamu Terashima_, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024年1月17日

多変量モード解析を用いた油圧プレス機の異常・故障監視技術の研究, 小島瑞貴, 武田尚恭, 寺島修, 日本機械学会北陸信越支部合同講演会, 2024年3月8日

相互相関解析を用いた油圧プレス機のシリンダの異常・故障検知技術の研究, 武田尚恭, 寺島修, 小島瑞貴, 第21回評価・診断に関するシンポジウム, 2023年12月1日

7. 内外における関連研究の状況

油圧プレス機を対象とした異常・故障検知技術に関する研究は、従来より加速度センサや油圧センサを用いた時系列信号の閾値判定や周波数領域解析を基盤として発展してきた。とくに、振動信号の統計量（RMS, CF, ピーク値）や FFT スペクトルに基づく監視手法が多く報告されており、商用の状態監視装置にも一部導入されている。しかし、これらの手法は単一センサ情報に依存しており、装置構成の複雑化・劣化の多様化に対応しきれていないという課題が指摘されている。

一方で近年では、複数センサ情報を統合的に解析する多変量時系列解析手法、ならびに機械学習を用いた異常検知・分類・予測の手法が製造装置診断の分野に導入されつつある。国外では統計的状态推定モデル、ベイズ推定を用いた予兆診断、さらに、GPR を用いた圧力低下予測などが報告されている。国内においても、旋盤や研削盤などを対象に PCA, ICA, POD などのモード分解法と機械学習を組み合わせた研究が進展しつつあるが、油圧プレス機に特化したものは限られている。

特に、拡張型固有直交分解法（Extended Proper Orthogonal Decomposition : EPOD）を用いた振動構造の抽出と、GPR による多変量時系列の予測を統合的に適用した研究例は極めて稀である。さらに、こうした高度な解析手法を既設の油圧プレス機に対して後付けで実装し、実環境下での連続運用に耐える形で具現化した報告はほとんど見られない。

本研究は、異種物理量の同時計測と EPOD・GPR を統合した解析手法を現場実装に展開し、予兆的な異常検知から原因推定・保守支援まで一貫して行う点で、内外の先行研究に対して独自性と実用性を兼ね備えた新規性の高い取り組みである。

8. 今後の発展に対する希望

本研究を発展させる形で、他の油圧機器（例：油圧ショベル、油圧シリンダ単体）の異常検知や故障予測への応用を検討する。また、Web アプリによる監視ダッシュボードの実装により、誰でも簡単に設備状態を把握できる環境を構築し、中小製造業の DX 推進に資する技術基盤の確立を目指す。