

博士論文（要約）

デジタル・トリプレット構想に基づく
知的状態監視システムの設計方法論

Design methodology of intelligent condition monitoring system
based on digital triplet concept

蛭田 智昭

本論文では、サーキュラー・エコノミーの実現に向けて、データドリブン型状態監視システムを設計するための課題を明らかにして、データから状態を把握する状態同定機能の設計方法を提案した。

第1章では、メンテナンスの重要性と、状態監視システムについて述べ、本論文の目的と構成を述べた。一方通行型経済モデルは持続不可能になりつつある。一方、資源効率を向上するサーキュラー・エコノミーが注目されている。サーキュラー・エコノミーでは、製品のライフサイクルマネジメントにおいて、製造から廃棄まで製品の価値を最大化し、資源効率を高める。特に製品の「使用・運用」の循環の施策であるメンテナンスが重要である。また、情報通信技術の発展や通信コストの低下により、状態監視システムは、高頻度かつ大容量なデータを対象機器から収集できるようになる。結果として、機器の大量のデータを使った状態監視保全が主流になっていくと予想する。以上の背景から、本論文では、予防保全の1つである状態監視保全を対象とした。

状態監視保全は、状態監視システムを介して実行される。状態監視システムは、対象機器から収集したデータを状態同定し、その結果をエンジニアに提示する。本論文では、状態同定機能を、入力データから対象機器の異常の度合いを算出するデータの処理プロセスと定義した。今後求められる状態監視システムは、機器の大量の稼働データを活用して状態監視保全を運用できること、さらに機器の稼働状況や環境に応じて、状態同定機能を柔軟に変化できることが重要になる。よって本論文では、データマイニングの技術を適用する状態同定機能を持つ、データドリブン型状態監視システムに注目した。データドリブン型状態監視システムの状態同定機能は、データサイエンティストによって設計されるとした。

データドリブン型状態監視システムでの実行フェーズにおいて、エンジニア自身が状態同定機能を理解しなければならない。しかしデータサイエンティストは、対象機器のエンジニアリング知識を持ち合わせていないため、機器の設計、運用、メンテナンスの現場を把握できず、エンジニアが解釈可能な状態同定機能を設計することは難しい。このようなデータサイエンティストとエンジニアのギャップが、データドリブン型状態監視システムの実用化の課題になると考えた。このギャップを埋めるための状態同定機能の設計方法が必要である。よって本論文の目的は、サーキュラー・エコノミーの実現に向けて、データドリブン型状態監視システムを設計するための課題を明らかにして、データから状態を把握する状態同定機能の設計方法を提案することとした。

第2章では、知的状態監視システムの既存研究と状態同定機能設計の既存方法を調査した。その結果、以下が明らかになった。(1) 知的状態監視システムの対象である検査・監視・診断では、機器の稼働データの蓄積を前提とした帰納的アプローチの研究が進められてきた。(2) 状態同定機能に相当するデータ処理プロセスの既存の設計方法は、デー

タサイエンティストが主体となり、データ起点の帰納的アプローチをとっていた。(3) 機械学習モデルの解釈性を向上させる研究は進んでいるが、エンジニアリング知識を活用していないため、実際の機械システムの挙動に関連付けて状態同定機能を解釈することができない。(4) 産業界では、重要なインフラにデータドリブン型状態監視システムが適用され始めており、今後は増えていくと予想する。

本論文では、ロバスト性を、状態同定機能が対象機械システムの過去起きていない未知の故障を扱えることと定義した。また解釈性を、状態同定機能の中身をエンジニアが理解できることと定義した。

データドリブン型状態監視システムが実用化されるにあたって、状態同定機能のロバスト性と解釈性の低さが問題になる。なぜならばデータドリブン型状態監視システムの状態同定機能は、データサイエンティストの帰納的アプローチによって設計されるためである。よってロバスト性、解釈性を向上させるために、演繹的アプローチ(知識)と帰納的アプローチ(データ)を融合する状態同定機能の設計方法が重要である。このため本論文の課題を、データドリブン型状態監視システムにおいて、状態同定機能のロバスト性と解釈性を高めることとした。この課題を解決するために、データサイエンティストとエンジニアが共同で状態同定機能を設計し、エンジニアのエンジニアリング知識を活用する。具体的には、既存研究であるデジタル・トリプレット(D3)構想に従い、データとエンジニアリング知識を結びつけるアプローチをとる。

第3章では、D3型状態同定機能設計方法を提案した。この設計方法の特徴は、データサイエンティストがエンジニアのエンジニアリング知識を引き出して、状態同定機能を設計することである。次に、D3型状態同定機能設計方法の構成について述べた。具体的には、D3型状態同定機能設計方法は、データ準備、前処理設計、本処理設計、後処理設計、状態同定機能実行、状態同定機能評価、実装判断で構成されるとした。次に、D3型状態同定機能設計方法におけるエンジニアのエンジニアリング知識を、形式知と暗黙知に分類した。次に、モータ軸受の異常の兆候をとらえる状態同定機能を設計し、D3型状態同定機能設計の構成が有効に機能することを確認した。

第4章では、エンジニアの形式知を活用した状態同定機能の設計方法を提案した。設計方法はデータ準備、前処理設計、本処理設計、後処理設計で構成される。データ準備は、エンジニアが物理モデルのモデリングとシミュレーションを実行するタスクである。さらにその後、データサイエンティストがシミュレーションデータと機械システムの蓄積データを取得する。前処理設計は、物理モデルを使ってセンサを選択し、観測データとシミュレーションデータを状態空間上の状態平面に変換するタスクである。本処理設計は、観測データの状態平面とあらかじめ準備しておいたシミュレーションデータの状態平面を比較し、最も差分の小さいシミュレーションデータの状態平面に対応する劣化の属性値を検索

するタスクである。後処理設計は、エンジニアへの情報として、劣化の度合いの時系列データを作成するタスクである。本設計方法により、エンジニアの形式知を物理モデル及びシミュレーションデータを介して、状態同定結果につなげることができる。さらにケーススタディとして、鉱山機械の重要部品である油圧ポンプを対象に、形式知を使った状態同定機能を設計し、油圧ポンプの劣化の度合いを推定した。最後に提案した設計方法について考察した。

第5章では、エンジニアの暗黙知を活用した状態同定機能の設計方法を提案した。状態同定機能の設計方法の課題として、データサイエンティストとエンジニアのバックグラウンドの違いによって、お互いのコミュニケーションが難しいこと、エンジニア自身が、エンジニアリング知識を引き出す方法を知らないことを明らかにした。これを解決するために、データサイエンティストがエンジニアに状態同定機能の仮説を示して、フィードバックを得ることで、エンジニアの暗黙知を引き出す設計方法を提案した。さらに設計支援手法として、Two-plot linkage 法、設計支援テーブル、状態抽出仮説生成手法を提案した。Two-plot linkage 法は、エンジニアとデータサイエンティストのデータを捉える視点の違いに注目し、時系列プロットと散布図の両方の視点でデータを見る手法である。設計支援テーブルは、エンジニアからのフィードバックの内容によって、更新すべき箇所や内容をまとめた表である。状態抽出仮説生成手法は、前処理設計の状態抽出を対象に、機械システムの定常状態を抽出するセンサと閾値の候補を蓄積データから生成する手法である。さらにケーススタディで、状態抽出仮説生成手法でエンジニアと同等の状態抽出を設計できることを示した。

さらに暗黙知を活用した状態同定機能の設計をサポートするためのエンジニアリングツールを開発した。その後、状態同定機能設計の1ケースにおいて、エンジニアリングツールを使うことで、状態同定機能の設計工数を8時間から30分に短縮できることを確認した。

第6章では、状態同定機能の既存の設計方法と比較し、D3型状態同定機能設計方法で、本論文の課題である状態同定機能のロバスト性と解釈性を高めることができたことを述べた。さらに形式知活用の設計方法と暗黙知活用の設計方法の使い分けの手順を述べた。さらに、形式知と暗黙知の両方を活用した状態同定機能の設計方法の概要を述べた。最後に、将来像として、データドリブン型状態監視システムの成長プロセスについて述べた。

第7章では、データサイエンティストとエンジニアのギャップを埋めるために、状態同定機能のロバスト性と解釈性を高める課題を整理し、それに対する解決方法を提案することによって、本論文の目的であるデータドリブン型状態監視システムの状態同定機能の設計方法を明らかにすることができた、と結論付けた。

社会に対する本論文の最大の貢献は、知的状態監視システムの状態同定機能の設計方法

論を体系化することによって、エンジニアのエンジニアリング知識を活用する設計方法を明らかにしたことである。これにより、（１）ロバスト性と解釈性の高い状態で、データドリブン型状態監視システムの実現、（２）エンジニアのエンジニアリング知識を状態同定機能に反映することによる日本の強い現場力の活用、（３）人々の生活基盤を支えるインフラ機器や、製造現場の機器を長寿命化することによるサーキュラー・エコノミーへの貢献が可能になる。

人類の持続可能な発展を推進するためには、サーキュラー・エコノミーを実現しなければならない。このためにはメンテナンスを通じて、資源効率を向上させることが重要である。これには D3 型状態同定機能設計方法が必要不可欠である。本論文が、人類の持続可能な社会の実現の一助となれば幸いである。