

氏名	佐久間 正剛		
授与学位	博士（工学）		
学位授与年月日	平成8年3月26日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻		
学位論文題目	原子力プラント機器劣化の監視診断に関する研究		
指導教官	東北大学教授 北村 正晴		
論文審査委員	東北大学教授 北村 正晴	東北大学教授 戸田 三朗	
	東北大学教授 平川 直弘	東北大学助教授 Kozma Robert	

論文内容要旨

第1章 序 論

高圧の気体や液体，放射性物質を内包する圧力容器や熱交換器などの機器やその相互を結ぶ多数の配管・バルブなどから構成される原子力発電プラントでは，高度な信頼性，安全性の維持が要求されている。その実現のために機器やセンサーの経年劣化により発生する故障や異常を早期に検出しようとする試みがなされてきた。従来の監視診断においては異常が顕在化した後の対応策や定期検査時の的確な保守点検業務などにその主眼が置かれており，オンラインでの状態監視は限られた機器の事前に規定された異常事象についてのみ行われてきた。より一層の安全性を達成するためには，異常が顕在化する以前から状態監視によりその傾向を見極め，劣化を予兆段階で検出し，事前の対応を図ることが重要であると考えられる。本論文では機器の劣化を予兆段階で検出するために，センサー出力信号の揺らぎ成分に着目し，複数の相互に原理が異なる信号処理手法の導入により多面的な視点から特徴を記述する，多面的な信号特徴抽出手法を提唱した。また機器劣化の予兆が発現する段階では機器は正常な機能を維持していると考えられるが，そのような段階でセンサーの劣化故障の有無についてあらかじめ確認しておくことが異常部位の特定や故障原因の絞り込みには重要である。センサーの劣化診断についても正常時のプロセス信号間にある制約関係を有効に活用した正常時モデルに基づく信号妥当性検証法を開発し，その有用性を評価した。更にこれら構成機器，センサーの劣化診断機能の将来的な原子力プラント計装系への実装の基礎としてソフトウェアエージェント自律分散型運転支援システムの枠組みを提唱し，その有効性についても数値実験を通して評価を行った。

第2章 異常予兆監視のための揺らぎ信号の多面的特徴抽出

本章では，異常の早期／予兆検出により，機器劣化の兆候を早期に発見し，速やかに対策を講じるための基本的な検出手法の枠組みと，従来手法の制約を緩和し補い得る手法を導入し，その有効性について考察した。オンラインプロセス計測信号の揺らぎ成分の特徴の変化に着目したときの，機器劣化の異常兆候の早期検出を高感度を実現するための基本的な方策として，視点や原理が相互に異なる信号処理手法の複数活用による多面的な特徴抽出と，これにより獲得された正常時特徴に基づき得られたパターンからの変化の検出を採用する。論文中ではこの多面的特徴抽出の全体概要について述べるとともに，特徴抽出の個別要素手法に関して非定常揺らぎ信号をも解析対象とする手法として，フラクタル解析，ウェーブレット解析を導入し，その有用性について考察した。揺らぎ信号の統計的な自己相似性（フラクタル

性)の特徴を抽出するためにフラクタル解析を採用した。従来のフラクタル解析では、信号にフラクタル性を仮定したうえでフラクタル次元に代表される指標のみによる状態識別・状態推定・特徴抽出が試みられてきた。このような解析の実信号への適用に際し、フラクタル性の有無自体がその信号の特徴であることが従来看過されてきている。本研究ではこの事実に着目し、フラクタル次元評価時に仮定されているフラクタルモデルからの逸脱の度合いを信号のフラクタル的な挙動からの逸脱を表す量としてフラクタル度と名付け、信号の特徴を表す指標として新たに導入した。模擬異常を重畳したフラクタル時系列信号の解析を通じ、フラクタル次元とその統計的誤差、およびフラクタル度という3指標の統合的利用により時系列信号の自己相似性に関する特徴を詳細に記述できることが確認できた。これによりフラクタル性の仮定に基づき記述される指標(フラクタル次元)とフニクタル性の仮定の充足性に関する指標(フラクタル度)が別個に規定できるため、従来フラクタル次元の評価のみではその変化の検出が困難であった、フラクタル次元は変化せずにフラクタル的性質が喪失するような状態変化を明確に検出可能となった。

また劣化による状態変化の初期段階では兆候が間欠的あるいは散発的に発現し、その振幅や接続時間が次第に増大した結果、顕在化に至ることが多いと考えられる。従来の信号特徴抽出手法ではこのようなごく微小な状態変化の検出、特徴抽出に必ずしも適当ではないため、この欠点を補う目的で短時間の信号特徴変化の検出に有効と考えられる処理手法として、近年注目されつつあるウェーブレット解析を採用した。模擬異常を重畳した時系列信号を解析し、状態の変化に対する信号の複数の次数のウェーブレット変換係数の変化の結果について考察した。スパイク状の外乱に代表される、接続時間が解析データ数に比べて短い変化の検出には、ウェーブレット変換が適切な手法であり間欠的、散発的に発現するような信号特徴変化を捉えるのに有効であることが示された。ウェーブレット解析においては、適切な次数の係数を監視することにより過渡的に発生している異常検出の可能性が実証的に示された。

これらの解析手法を典型的な模擬異常を重畳した信号の特徴抽出に適用し、信号の特徴の変化と解析結果の対応関係について考察した。さらにこれらの特徴抽出手法をオランダのデルフト工科大学の研究用原子炉にて行われた冷却材沸騰異常模擬実験において記録された中性子検出器信号揺らぎ成分の特徴抽出に適用し、冷却材沸騰に関連した状態変化に対応する解析の結果得られる特徴量の変化の様子について考察した。その結果、従来手法のみでは検出の困難と思われる性質、特徴について抽出するとともにその特徴の変化の捕捉可能性を確認した。

第3章 正常時モデルに基づく信号妥当性検証手法

本章では、信号妥当性検証手法として正常時モデルを有効に活用する、極小過剰制約集合を用いた方法を提唱し、その有効性を検証した。極小過剰制約集合とは、対象とする原子力プラントの構成機器の正常挙動に対応するモデルを物理的な素過程・法則式の形で記述し、それらの式の組み合わせから導出される制約条件過剰の自由度が1である相互に独立な方程式の集合である。極小過剰制約集合の制約過剰性を活用し導出された集合に基づく定量的制約計算により、集合内部の整合性の有無の判定結果から統計的に故障センサーを同定する。導かれた各集合の整合性チェック結果と集合を構成しているセンサーの組み合わせから、整合性が喪失している集合に共通して含まれているセンサーが故障センサーであるという同定結果を導くことができる。この故障センサーを導出する過程を集合ごとの整合性判定結果やセンサー集合の対応関係をベクトルや行列で表現し、これらを活用した一連の論理演算として定式化した。センサーの単一故障を仮定した場合に、導出された極小過剰制約集合を効率的に選択する方法についても考察し、計算の効率化を図った。提案した手法を加圧水型原子力プラントの重要な構成機器の1つである加圧器に適用した場合について検討し、具体的な数値計算を通してその期待される機能を確認できた。その結果従来不明確なまま経験的に決定されていた変数間の因果関係などが数式モデルから明確になるため、局所的な制約関係の有効活用により効率的な妥当性検証が可能なが示された。また対象のモデルの線形性や、変数の入出力関係など従来の方法を適用する際の前提条件などが基本的に不要であり、プラントの過渡応答時にもセンサー故障検出が可能である。更にニューラルネットワークの導入により、煩雑になりがちであった定量的制約計算の過程を簡素化することができた。また事前に不整合な集合の組み合わせと故障センサーの対応関係をデータベース化しておくことにより実装時にも十分な即応性を有する診断手法となり得ることの可能性を示している。

第4章 ソフトウェアエージェント集団による自律分散型運転支援システムの枠組み

ソフトウェアエージェントを導入した自律分散型運転支援システムの有効性はこれまでもその有用性は指摘されているが、その研究の多くは現実的な工学的応用を視野に入れた研究ではなく、大多数は生物学的興味などによるものである。そこには依然として技術の応用分野と基礎的研究の間に大きな隔りがあると考えられる。本章ではこれらの間のギャップを埋める手法の開発を試みている。原子力プラント内で保守安全に従事するハードウェアエージェント（＝ロボット）や、計装ネットワーク上で状態監視保全を実現する、信号特徴抽出、信号妥当性検証等の機能を有するソフトウェアエージェントの挙動を規定する為の基本的な枠組みとして、真社会性エージェント組織モデルを提唱し、その構成エージェントの協調戦略と中心セクタのマクロな資源配分戦略との一般的関係をネットワーク環境の下で明らかにすることを目的とした。エージェントの行動規範としての Ant Algorithm に代表されるような真社会性モデル概念を基礎として、エージェント集団内での各種エージェントの生産供給を通じた間接的統率をつかさどる中心セクタ（女王アリ）を導入し、拡張を図ったアーキテクチャを提唱する。提唱する新たな真社会性モデルにおける組織化の基本原理は、有限な各エージェントの寿命と中心セクタのエージェント生産供給を通じた資源配分戦略および各エージェント間の相互干渉を生む協調戦略である。従来このような固体の生産と消滅のバランスは主に人口理論によって扱われてきており、真社会モデルのような組織における中心セクタのマクロな資源配分に対する各固体の自律性や協調性の影響の研究はあまりなされていない。しかし工学的システムにおけるマルチエージェント的処理系実現のためには不可欠な視点と考える。本章では簡単な数値評価実験を通して、その一般的特性と適用性について考察した。エージェント間の協調戦略を変更した時の、異常検知頻度の変化、中心セクタの個体数制御戦略において異常検知頻度を反映させるパラメータの大きさを変更した時の、エージェント数の増減への影響と協調戦略との関係などを明らかにした。エージェント間の協調戦略を変えたときのエージェント集団のタスクの成功率などから、少ない個体数で優れた性能を示すエージェント集団のありかたについて基礎的な考察をおこなった。また、中心管理機構による個体数制御戦略の導入により利用者たる人間の目的／意図に応じた挙動をエージェント集団におこなわせるための基本方式として、提案手法の有効性を確認できた。

第5章 結 論

原子力プラントの機器劣化の監視診断の高度化、高信頼化のための基礎的な技術開発を行った。機器の劣化状態の予兆段階での検出方法、対象プラント正常時のセンサーの劣化診断手法、およびこれらの要素手法を将来想定されるプラント計装系の計算機ネットワーク上に実装する場合の自律分散システムに関する枠組みについて提唱し、それぞれの有効性を数値実験を通じて実証している。本研究で提唱した基礎的手法の実用化と現場適用とを通じ、原子力発電プラント運転時の安全性を一層向上出来るものとする次第である。

審査結果の要旨

原子力プラント運転安全性の一層の向上のためには、適切な予防保全に基づいた機器健全性の確保が大きな意義を持つが、その実現のためにはプラント構成要素である機器の劣化を予兆の段階で検出・識別する技法を確立することが必要である。予兆の段階で劣化を検出できればプラントの運転計画に沿って定期検査期間などを活用した予防保全が行えるが、この段階で観測される症候の信号レベルは格段に低く、かつ時間的特性が間欠的、散発的であるため信号処理上の困難が大きい。本研究はこの課題解決のための基盤技術開発を目的としたもので、全編5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では予兆症候の多くが非定常ゆらぎ外乱の形をとることに着目して、その検出と特徴づけにフラクタル解析とウェーブレット解析を統合利用する手法を提唱している。フラクタル解析においては、信号のフラクタル性の度合いを示すフラクタル度という新しい指標を定義しその評価法を確立した。またウェーブレット解析においては、ガボール関数を基底として時間・周波数分解能を着目事象に応じて適応的に選択できる方式が本研究の目的に適合していることを見だし、この変換を効率よく実行するアルゴリズムを導入している。これらの方式をオランダのデルフト工科大学の実験用原子炉HORで測定された信号をベースとして作成された模擬予兆信号の解析に適用し、提唱手法が在来の信号解析手法の欠点を補完する重要な役割を果たすものであることを実証した。

第3章では、予兆検出と密接に関連する信号妥当性検証 (Signal Validation) のための、新しい手法を提案している。この課題に対しては従来個々の検出系やサブシステムごとに便宜的な仮定に基づいた手法の適用が試みられてきたに過ぎず、実用性の高い手法の確立が期待されていた。本研究では、故障モードを仮定することなく正常時挙動モデルを情報源として合理的に活用するための、極小過剰集合という独創的な概念を導入し、これを基礎として異常検出器の絞り込みを効果的に行える制約条件処理アルゴリズムを提唱している。この手法を加圧水型原子力プラントの加圧器系検出器異常検出に適用し、その有用性をシミュレーション実験を通じて実証した。

第4章では、予兆検出や診断のための多様な信号処理技法を実際に原子力プラントに実装するための基本的枠組みについて検討している。多数の機器や検出器の劣化監視を効率的に実行するため、計装ネットワーク内部を自律的に移動して必要とされる処理を実行する、社会性昆虫モデル概念に基礎をおいた自律的マルチエージェントの枠組みを提唱し、その有効性を数値実験を通じて検証した。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、原子力プラント機器劣化の監視診断技法開発という重要課題に対して独自の着想に基づく手法を提唱しその有用性を実証したもので、原子核工学ならびに核計測計装工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。