論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目　　フラクタル次元を用いた時系列データの異常診断に関する研究

氏　　名　　領木　慎一

　近年のIoT技術の進歩により，様々なセンシング技術や通信技術により多種多様なデータを低コストで取得することが可能になってきた．それらのデータを用いた設備モニタリングは，得られたデータを特徴づけるパラメタが必要となる．本論文では，「フラクタル次元を用いた時系列データの異常診断に関する研究」と題し，無次元パラメタである「フラクタル次元」に着目し，周期性を持つ時系列データに対するフラクタル次元解析について論じており，全５章で構成される．

　第1章は序論であり，本研究の背景，目的と論文の構成が述べられている．メンテナンス設備の対象として回転機を取り上げ，時系列データの状態判断手法について説明した．診断における特徴パラメタのひとつとしてフラクタル次元値を用い，時系列データのフラクタル次元算出手法，接触式センサで取得した振動データにより状態診断が可能であるとする先行研究等について説明を行い，時系列データの汎用的なフラクタル次元解析手順が未策定であること，音などの非接触式センサにおけるフラクタル次元解析が未検証であることを示した．本研究ではこれらの課題を解決し，非接触センサを主体としたフラクタル次元解析の設備異常診断への適用を目的とする．

　第 2 章では，時系列データに対する測定時の手法を構築するため，フラクタル次元値の理論的な特性を検証し，時系列データによるフラクタル次元解析手法を提案した．フラクタル次元値の特性検証では，模擬的に生成した正弦波の時系列データを，madogram 法によりフラクタル次元化する際の特性を理論的に明らかにした．フラクタル次元は基本周波数 f に対するサンプリングレート依存性により，サンプリングレートが $2f/(2p-1)$において発散，f/q において収束する特性を持ち，フラクタル次元算出のデータ数が増加するとフラクタル

次元値の標準偏差は減少し，標準偏差とサンプリングレート依存性からフラクタル次元値の周波数分解能が推定できる．また，ノイズのみしかとらえられない場合，フラクタル次元値は 2 に収束するため，サンプリングレート依存性を確認することでシグナル取得の有無が確認できる．サンプリングレートに関わらず異常波形の周波数に対してフラクタル次元値は動的に変動するため，サンプリングレートより高い周波数においても異常把握が可能であり，より動的に変動を確認するのに最適なサンプリングレートは，基本周波数 f に対してサンプリングレート 1.5f である．以上のことから，フラクタル次元値による状態診断では，あらかじめ異常波形がわからない場合においても，正常時からの変動を確認することで状態診断が可能であること，変動がサンプリングレートによる上限制約を受けないことから広帯域における状態監視が可能であることが分かった．これより，データ処理の手順を提案し解析を行い，公開データを用いた回転機軸受内部の傷の大きさごとに，正常データのみで設定したサンプリングレート，データ数，平均化数からフラクタル次元値が標準偏差を超えて異なることを確認し，状態把握が可能であることを示した．

第 3 章では，2 章で提案した解析手法が非接触センサでも適用可能であることを確認するため，回転試験装置で作り出した各種状態に対して接触式センサで取得した振動，非接触式センサで取得した音及び磁場の時系列データにてフラクタル次元解析を行った．磁場の計測には非接触の磁場発信機を提案した．結果，音波においても提案した解析手法でフラクタル次元は変動することを確認した．回転試験機を用いた実験では，ミスアライメントの状態である偏心距離 190μm に対して約 66%の距離である 127μm においても変動は確認でき，また偏心距離ごとにフラクタル次元値はそれぞれ異なる値となり，音波によるフラクタル次元解析が有効であることを確認した．異常発生個所であるカップリング部分からセンサを離して計測したため，指向性の高い振動においては 190μm までフラクタル次元の有効な変動が確認できなかった．これにより，低い指向性を持つマイクロホンを用いた音波計測の広いカバーエリアを確認した．接触式振動センサの代わりに，振動ハーベスタを電源，磁場発信源としてチョークコイルを用いた磁場発信機を提案し，非接触での計測で磁場センサとの距離が 1cm の状態で加振器の加速度下限である 0.1m/s^2 までの検出が可能であることを確認した．これを用いたフラクタル次元解析では動作原理が同じ加速度ピックアップによる振動データと同じ変動を示し，非接触式の振動センサとしてフラクタル次元解析に適用可能であることを確認した．また，磁場発信機の発信距離の長距離化のため，薄膜と液体を用いたハーベスタを提案し，共振周波数近辺にて約 450％の広帯域化を実現し，その出力電圧も液体 1g あたり約 400mV の増加が得られた．

第4章では，外的要因によりフラクタル次元値が変動する状況においてフラクタル次元解析の有用性を確認するため，実環境設備を用いて長期稼働試験における音波のフラクタル次元解析を行った．負荷変動や環境音の変化によりフラクタル次元値は0.015程度の変動を

示したが，この変動はフラクタル次元算出のデータ数を調整することで正常状態における外部要因の変化を1σの変動範囲内に収めることができた．この状態においても，カップリング部分のボルトゴムの劣化に応じてフラクタル次元値は1σを超えて変動することを確認した．その後，ゴム劣化に伴う「なじみ」の状態と考えられる事象により，フラクタル次元値は正常時に近づくように変化した．最終的にゴム破断に至るまでフラクタル次元値は動的に変動を繰り返し，その変動量はゴムの劣化が進むごとに大きくなっていった．また，測定データからフーリエ解析との比較を行い，フラクタル次元値は固定したサンプリングレートによる測定において，異常波形の周波数により動的に変化していくため，ポンプのような複雑な機構の機器で故障要因が多様であり，その際の異常周波数の把握が難しいような設備において，系全体の正常/異常状態を把握する手段として有用であることを確認した．一方でフーリエ解析のような周波数毎の変動を詳細に捉えることは難しく，ピンポイントで計測を行うような指向性の高いセンサよりも，今回検証した音のような指向性が低くある一定の範囲をカバーするようなセンサのほうが適していることを示した．

第5章は総括であり，各章の主な成果をまとめ，本論文の結論について述べている．

以上，本論文では，フラクタル次元を用いた時系列データ解析について論じた．本手法は正常状態しかデータ計測ができないような設備に対して幅広い異常周波数に対応することができ，また，特に音による解析は装置全体を，振動や磁場は局所的な部品のモニタリングに適しており状況に応じて選択が可能であり，非接触式のセンサであっても時系列データが得られるのであれば適用は可能である．これらの特徴は予防保全の分野において大いに貢献することが期待される．