

令和元年6月20日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06418

研究課題名(和文) パーティクルフィルタによるセンサの故障検知・隔離・回復

研究課題名(英文) Detection / isolation / recovery of sensor failure by particle filters

研究代表者

西田 健 (Nishida, Takeshi)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30346861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：確率的なノイズが混入するシステムの状態推定において、パーティクルフィルタ(PF: particle filter)は、状態量を多数の状態の仮説(粒子)を用いてフィルタ分布を離散近似するため、非ガウス分布に従うノイズが混入する系の状態を推定することができる。本研究では、状態フィードバック制御系のオブザーバとしてPFを利用することで、制御系の状態推定と異常の定量化を同時に実行する手法を提案した。具体的には、オブザーバとして制御系に組み込まれたPFの粒子分布の監視により、制御系の振る舞いの、所与のモデルからの逸脱を定量化することで、センサの異常を検知する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動化が進む産業機器やインフラ設備において故障検出技術は重要である。しかし従来技術では、対象とする機器の自動化装置や制御装置とは別に、あらたに故障検出のための機器を設置する必要があるため、高額な費用や故障検出器自体のメンテナンスが発生する。一方で、本研究成果を活用すれば、すでに搭載されている制御装置内の伝達ノイズを監視するだけで故障が可能になる。したがって、本研究成果は、広く利用されている機器の安全性を保障するために有用な基礎技術であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：On the state estimation of a system including stochastic noises, particle filter (PF: particle filter) discretely approximates its filter distribution by using state hypotheses (particles) of many states, so it is possible to estimate the state of the system including non-Gaussian noise. In this research, we proposed a method to simultaneously execute estimation of control system state and quantification of abnormality by using PF as an observer of state feedback control system. Specifically, we proposed a method to detect sensor abnormalities by quantifying the deviation of the control system's behavior from a given model by monitoring the particle distribution of the PF incorporated into the control system as an observer.

研究分野：Probabilistic control engineering

キーワード：particle filter feedback system state observer

1. 研究開始当初の背景

IoT や Industry 4.0 等、ビッグデータを扱う新規技術の普及に伴い、今後数年間でセンサの消費量が数倍に増加すると予測されている。一方で、安価なセンサの大量流通は、センサ群がすべて正常に動作する確率が指数的に低減することを意味するため、故障に備えたシステム構築が重要である。

従来、センサの故障検知・隔離・回復 (FDIR: fault detection, isolation, and recovery) に関する技術は幅広い領域で研究されており、近年のシステムの高機能化に伴って重要性が増している。FDIR の実現においては、システムの「冗長性」が最も重要な要素であることが知られており、その実現手段は「物理的冗長性」と「解析的冗長性」に大別できる。前者は、冗長なハードウェアを準備して利用する手法である。後者は、システムモデルを利用する解析的手法であり、ハードウェアの追加を必要とせず、前者よりも導入コストが低い。また、センサ数の増加と運用コストの増加が直接的に関連しないため、IoT などのような大量かつ安価なセンサ群に対して有効である。

導入が容易な解析的冗長性に基づく FDIR は、残差 (予測出力と計測の差) の扱い方の観点から、ロバスト残差生成手法とロバスト残差推定手法に大別できる。前者は故障のみに感度が高いロバスト推定器を用いる手法である。後者は故障によるパラメータ変化を検知するために残差評価を行う手法である。前者は対象の正確なモデルや故障の状況について豊富な事前知識が必要であるが、後者はより一般的な状況、すなわち想定外の事象にも対応可能であり、汎用性が高い。

他方、システムパラメータの変化を確率的に定量化する手法は、確率フィルタに関する研究領域において、時系列信号の事後確率分布推定と尤度比検定という文脈で従来から議論されてきた。また、センサの故障の際には、センサ信号に混入するノイズの統計的性質が変化するという事実が知られている。

本研究開始当初において、ロバスト残差推定手法に基づく FDIR を確率フィルタによって実現することで、特殊な機器を用いることなくセンサの故障検知を実現し、さらに、その種類の判別まで同時に達成することができるのではないかと、という着想に至った。また、その実現には、リアルタイムに非ガウス性の事後確率分布を推定する手法、すなわちパーティクルフィルタ (PF: particle filter) が利用できるという見通しが立った。

2. 研究の目的

複数異種のセンサ信号を監視し、センサの故障検知、システムからの隔離、およびシステムの回復を行うための、ハードウェアの追加を必要としない高速かつ高精度な解析的手法を構築することを研究目的とした。そのためにまず、ノイズの統計的な変化を定量化する手法を開発し、センサ信号の確からしさを確率論に基づいて定量化する手法を確立することを第一の目的とした。次に、定量化された値を用いる故障の種別判定、故障内容に応じたセンサの隔離やシステムの回復を行う機能安全のための機構を構築することを第二の目的とした。

3. 研究の方法

複数のセンサが接続される制御系を仮定し、PF による状態推定機構を構成した。この系は、PF による事後確率分布の MAP 推定値 (最大事後推定値) をフィードバックする状態フィードバック系である。次に、PF の事後確率の正常からの逸脱度の定量化を利用する FDIR 機構を構成した。これは、非ガウス性の事後確率をリアルタイムで評価することでセンサの故障検知を行う機構である。故障検知時には、故障したセンサを特定して迅速にシステムから切り離し、その隔離の影響を予測し、目標値の変更、フィードバックゲインの調整などを実行する。

平成 28 年度は、事後確率分布評価のための二種類の手法の適用に関して、以下の項目を順次遂行した。

PF の事後確率分布の概形を任意の精度で抽出する手法である PF-mCRL の適用によって、故障検知手法の確立を試みた。すなわち、例えば「確率分布がガウス分布に近いほど各センサの計測状況が良く、多峰分布であれば計測状況が悪い」というような、「事後確率分布の概形」と「センサの計測の確からしさ」の関連性を定量化し評価した。本試行により以下の点が問題として明確になった：センサの故障に伴う観測ノイズの瞬間的な変化を捕らえることはできることは確証が得られた。しかし、PF のリサンプリング処理が確率分布の概形を整形することで、予備知識と異なる統計量に従った粒子の分布 (本研究で知りたい情報) を消去する。したがって、故障が徐々に進行するようなケースには、本手法の単純な適用は脆弱である。

故障検出のために、PF の粒子分布を基にした尤度検定の導入を試みた。全てのセンサは正常で、外れ値は偶然の誤差だとする帰無仮説と、故障したセンサが存在するという対立仮説の尤度比較を行い、それらの尤度比 (逸脱度) を算出することで、どちらの仮説が

優位かを判定する手法である。しかし、この手法の適用でもノイズの統計的性質が変化した瞬間の発見は可能であるが、故障が徐々に進行するようなケースには脆弱であることが見出された。

平成 29 年度は、三種類の確率分布の監視手法を構築し、それらの性能を検証した。まず、有効サンプルサイズ (ESS) の値の変化を監視することで、観測モデルの統計的な変化を検出する手法を構築した。事前に設計されたシステムモデルと観測モデルに対して、実プラントの統計的なふるまいが忠実であれば、粒子の重みの偏りは急激には増加せず、リサンプリングステップ後から ESS の値が徐々に減少していく。一方で、システムに障害が発生し、急激にプラントの統計的な挙動が変化した場合には、粒子分布による観測の近似精度が急激に低下し、急激な ESS の減少が生ずる。そこで、ESS の急激な減少を観測することでシステムの故障を判定する手法を確立した。

つぎに、事前に用意された観測モデルと状態推定結果 (重みつき粒子分布) の類似度を二乗検定により判定する手法を構築した。本手法によっても、故障判定を行うことができることを確認した。

しかし、これらの二種類の手法では、モデルと推定の乖離をスカラの値で表現するのみであり、故障の種類を判定することはできなかった。そこで最後に、PF の粒子分布を時系列方向に重畳してヒストグラム化する手法を構築した。この手法により、事前に想定されたモデルからの故障状態における逸脱と逸脱の種類を定量化できることを示した。

平成 30 年度は、これまでに開発した手法を統合し、状態フィードバック制御系のオブザーバとして PF を利用することで、制御系の状態推定とシステムの異常の定量化を同時に実行する手法を構築した。具体的には、オブザーバとして制御系に組み込まれた PF の粒子分布の監視により、制御系の所与のモデルからの逸脱を定量化することで、システムの異常を検知する手法を提案した。また、粒子分布の監視のための距離尺度や時系列情報の集積手法を複数提案した。さらに、本手法の有効性をシミュレーションによって比較検討した。その結果、提案手法では、PF によって非線形確率系の状態推定と異常の進行の時系列監視だけでなく、未知の故障の検知や定量化、異常の種類の特特定などが可能であることが示された。また、異常の種類によって、その検出に有効な距離尺度が異なることが見出された。

4. 研究成果

複数のセンサが接続される制御系において、PF による事後確率の正常からの逸脱度の定量化を利用する FDIR 機構を構成した。有効サンプルサイズを観測する手法、状態推定結果の類似度を二乗検定により判定する手、PF の粒子分布を時系列方向に重畳してヒストグラム化する手法を構築した。これらの手法により、故障状態とその種類を定量化できることを示した。さらに、開発した手法を統合し、制御系の状態推定とシステムの異常の定量化を同時に実行する手法を構築した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Masaru Morita, Takeshi Nishida, Development of state estimation filter simulator built on an integrated GUI framework, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, Vol.20, No.5, pp.721-729, 2016.

〔学会発表〕(計 3 件)

西田, 藤本, 森田, パーティクルフィルタによる状態推定と異常検知, 第 37 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 査読無, 101A4, Nov. 23, 2018.

N. Tokudome, S. Ayukawa, S. Ninomiya, S. Enokida, T. Nishida, Development of Real-time Environment Recognition System using LiDAR for Autonomous Driving, 査読有, Proc. of ICT-ROBOT, pp. 1-4, 2017.

T. Barbié, R. Kabutan, R. Tanaka, T. Nishida, Helping Optimization Based Planners: Generating Trajectories Seeds using Motion Datasets, Proc. of ICRA2017 Workshop "AI in Automation, 査読有, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織 特になし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。