

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820167

研究課題名(和文) 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技術の確立と制御系構成法の提案

研究課題名(英文) Establish of quantification technique of sensor signal reliability based on probability theory and proposition of construction method of its control system

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：センサ信号に含まれるノイズの確率分布をパーティクルフィルタ(PF)によって推定し、センサ信号の異常や逸脱の程度を定量化する手法の研究を行った。PFの粒子分布から点推定を行う機構、推定の信頼性を評価する機構、それらを状態フィードバック制御系に組み込む手法を構築した。また、PFの粒子分布の時間推移を観測するためのビジュアライザを開発した。構築した手法によって、故障したセンサ信号を選択的に分離して状態推定し、フィードバック制御ができることをシミュレーションにより確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish an estimation method of probabilistic distribution of noise included in sensor signals and a quantification method of abnormal signals by using particle filters (PF). The structure of point estimation from particle distribution of the PF, the structure of evaluation of the reliability of the estimate, and the method to incorporate them into a state feedback control system had been developed. In addition, we developed a visualizer to observe the transition in time for particle distribution of the PF. It was confirmed by simulations that the developed method enables separation of abnormal sensor signal selectively and executes the state estimation and state feedback control appropriately.

研究分野：確率ロボティクス

キーワード：パーティクルフィルタ センサノイズ 状態フィードバック 制御系

1. 研究開始当初の背景

センサの数や種類を多くすれば計測精度が向上するように直感的に思えるが、センサデータを単純に統合すると計測精度は低下する。これは、実環境で発生する多くの確率ノイズは単純なガウス分布ではないことに起因する(図1の場合には計測が多峰性確率分布を形成しており、センサAの計測のみに従うことが望ましい)。その典型例が、移動ロボットや自動運転における複数異種のセンサ統合である。従来、確率ノイズの対処にはカルマンフィルタ(KF)などが利用されてきたが、自律移動ロボットに混入する確率ノイズの多くは非ガウス性を有するため、十分な推定精度が保障されないという問題が顕在化している[1]。近年、この問題に対して確率論に基づいた問題の整理と、解決のための枠組みが提供されつつあり[2]、中でもパーティクルフィルタ(PF)に期待が寄せられている。PFはKFが無効となるような系、すなわち非線形・非ガウス型の状態空間モデルへの適用が可能な確率フィルタである[3]。一方、PFをロボットの地図生成や自己位置推定などの高次制御系に適用する研究は多いが、レギュレータ系などの低次制御系にPFを適用する研究は少ない[3]。その原因は、PFによる事後推定から唯一の推定値(特性値)を安定して抽出する方法論が確立されていないことにある。

従来の基礎研究に基づけば、MMSE(最小平均二乗)推定やMAP(最大事後)推定

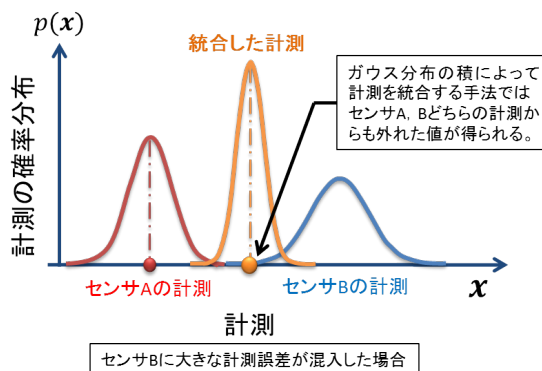


図1 複数のセンサの計測の統合の概念

などの手法があるが、これらには大きな推定誤差を生ずる、推定が振動する、推定が離散的に大きく移動するなどの問題がある[4]。これらの問題の解決のために、我々はPFの推定によって得られた事後確率分布を各時刻において最適にベクトル量子化する手法(PF-mCRL法)[4]を提案している。その特長は、PFによる推定結果から唯一の特性値と「推定の確からしさ」を同時に扱いやすい形式で抽出できることにある。そこで、この手法、もしくは新しく開発する手法によって、PFの粒子の分布の変化から、推定の確からしさを定量化し、それをセンサ信号の異常や逸脱の程度と関連付け、制御系の安定化に役立てることができるのではないかとこの着想を得た。

2. 研究の目的

本研究では、図2のようにPFを利用したレギュレータとオブザーバの併合系を構成することを考えた。すなわち、確度の高い特性値を選択的に抽出する機構(特性値抽出器)と、抽出された特性値の信頼性を評価する機構(確率分布評価器)の構築である。さらに、確率分布評価器の出力を有効利用するために、フィードバックゲインと目標値発生器の調整機構の構成である。これは、計測の信頼性が著しく低下した場合にはフィードバックゲインを小さく調整することで急な動作を抑制し、環境計測が安定的に行える場所や方向に目標を変更するような適応動作の生成を目的とする機構である。

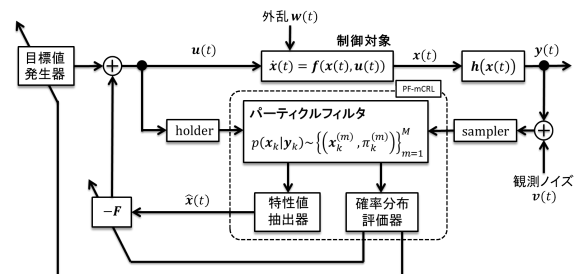


図2 パーティクルフィルタを組み込んだ状態フィードバック制御系の概念

3. 研究の方法

本研究では、PF を低レベル制御系に適用することにより、過酷な確率ノイズに曝される制御系の安定な駆動の実現を目指した。これを実現するため、サブテーマを設定し研究を順次遂行した。

【サブテーマ1：特性値抽出器の構成】

- PF オブザーバの構築：線形系および非線形系のオープンループ系を構成し、PF オブザーバが多峰性確率ノイズに対して適切な推定を行うことを確かめる。
- 特性値抽出器の構成：PF-mCRL アルゴリズムによる特性値抽出器を構成する。

【サブテーマ2：確率分布評価器の構成】

PF により事後確率分布の概形を重み付き粒子の分布として知ることができる。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「確率分布の形状と望ましい計測環境の関係性を記述できる」という仮説に基づけば、「確率分布の概形」と「計測の確からしさ」の関連性を定量化できる。本研究ではこの仮説に基づき、確率分布の概形を分類する指標を提案する。そこで以下の項目について検討を行う。

- 事後確率分布の形状の分類指標の検討：具体的な移動ロボット系を想定し、発生し得るセンサデータの事後確率分布の形状を考察する。
- 事後確率分布の分類アルゴリズムの構築：上述の検討結果を定量的に統合する具体的アルゴリズムを構築する。

【サブテーマ3：併合系の構成】

- 特性値抽出器、確率分布評価器を統合した制御系の構成を行う。
- 適応調整則の設定：確率分布評価器の出力に基づくフィードバックゲインもしくは目標値生成器の適応調整則を構築し検討を行う。

- 各種制御系を想定した検討：時変多峰性ノイズが混入する制御系を想定し、本手法の有効性をシミュレーションによって検証する。

【サブテーマ4：移動ロボット系を想定したシミュレーションと実験】

- シミュレーション：移動ロボットに搭載された複数異種のセンサからの状態推定が多峰性を形成する状況を再現し、提案手法によって構成した適応制御系が有効に動作することを示す。
- 従来手法との比較：観測に時変かつ多峰性の観測ノイズが印加されるような制御系について検証する。

4. 研究成果

まず、サブテーマ1に関する研究として、特性値抽出器の構成に取り組んだ。最初に、カーネル密度推定に基づく粒子分布のクラスタ分離手法を検証した。これは、粒子の分布を適切にクラスタ分割することで、峰（クラスタ）を数える手法である。これは簡便な手法ではあるが、複数のハイパーパラメータの設定が必要であり、状況ごとに設定を変更しなければならないという問題が確認された。一方で、パラメータの調整によって有効に機能する場合も確認された。次に、二種類のアルゴリズムを構築し検証した。クラスタ分割された各粒子群にMMSEを適用する手法と、各粒子群に局所的なカーネル密度推定を適用する手法である。それらの手法の推定精度を、MMSE (minimum mean square estimation)、EP-VGM (end point-Viterbi Godsill) MAP 推定手法、pf-MAP 推定法などの従来手と比較した。その結果、非線形対象に多峰性の確率分布を有する計測ノイズが混入する場合には、新しく構築した二種類の手法が有効であることを確認した。一方で、線形対象に単峰性ノイズが混入するような場合には、すべての手法で特に性能の差異が見られないことも確認した。計算量を考慮するとMMSEが最良であっ

た。

次に、サブテーマ2について研究を遂行するために、種々の信号とノイズ、PFの推定の時間変化を直接観察するためのビジュアライザ(図3)を開発した。この開発により、種々の変容の場面でPFがどのような挙動を示すのかを詳細に検証することを可能とした。次に、このビジュアライザを利用して、確率分布の時間的な変容を定量化するための二種類の手法を開発した。一つ目は、PFの粒子分布をベクトル量子化し、任意の精度で粒子の重みつき分布密度を提示する手法であり、二つ目は、正常時と異常時の確率分布の類似度を尤度検定により定量化する手法である。前者の手法は、二次元の状態空間で有効に動作することを確認した。後者は一次元の状態でも有効に動作することを確認した。さらに高次の状態推定に関しては継続して研究を遂行している。

さらにサブテーマ3について、複数のセンサ入力が存在する併合系を構築し、提案手法を組み込んだシミュレーションを行えるよう環境を整備した。種々の状況を想定したシミュレーションを行い、本研究で構成したPFによるオブザーバと関連機構が有効に作用し、故障したセンサを選択的に分離して状態推定を行うことができることを確認した。

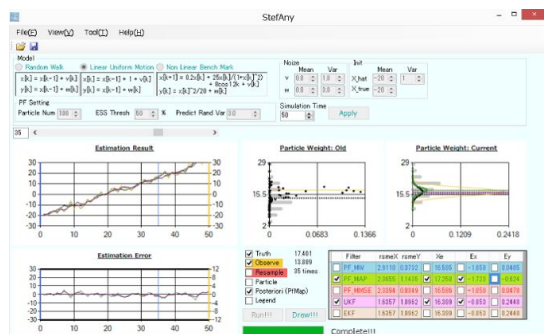


図3 PFの挙動を解析するために開発したビジュアライザの概観

最後にサブテーマ4については、自律移動ロボットやドローンなど、非線形要素を多く含むシステムを対象として、本研究の成果を

適用する取り組みを開始した。本研究成果がこれらの制御対象において有効であることを示すために、現在研究を継続して進行している。

本研究は、低次制御系における非ガウス性確率ノイズを陽に考慮する研究であるという学術的特色と獨創性を有する。PFによって近似された非ガウス性の事後確率分布の最尤値だけでなく、「計測の確からしさ」も同時に抽出して考慮する点で、本研究で提案する技術は従来研究と異なる。また、多様な環境ノイズに曝されるロボット制御系の状態推定と制御を安定的に連動させる技術であり、他には見られない獨創的なものである。

今後の課題としては、高次の状態推定への本手法の適用や、実際のロボットに搭載して本研究の有効性を示すことなどである。

[参考文献]

[1]上田, “確率ロボティクスの展望”, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.5, pp.404-407, 2011.

[2]S.Thrun, W. Burgard and D.Fox: Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005.

[3]西田, “パーティクルフィルタとロボット制御”, 第3回横幹連合シンポジウム, 早稲田大学, 2010.

[4]西田ら, “パーティクルフィルタと適応ベクトル量子化による事後確率分布からの高次情報の特性値抽出”, 信学論, Vol. J94-D, No.2, pp.450-459, 2011.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 7件)

西田, 森田, 'パーティクルフィルタによるFDIR機構構築の取り組み,' 逐次モンテカルロ法の多分野への水平展開と総合による知見の集約, 統計数理研究所共同研究レポート 367, pp.73-78, 2016年3月9日, 統計数理研究所.

有田, 森田, 西田, ''パーティクルフィルタによる多峰性事後確率分布からのMAP 推定手法の比較と検討,'' SI2015, pp.1361-1366, 2015年12月15日, 名古屋国際会議場.

西田, ''パーティクルフィルタによるセンサの故障検出と隔離,'' FAN2015, pp.132-135, 2015年9月25日, 東北大学.

森田, 西田, ''状態推定フィルタ統合シミュレータ"StefAny"の開発,'' FAN2015, pp.121-126, 2015年9月25日, 東北大学.

Takeshi Nishida, ''State estimation and control of a mobile robot using probabilistic filters,'' ICROS-SICE Kyushu Chapter 1st Joint Workshop on Robotics and Control, Proc. of Workshop, pp. 33-34, 2015年, 1月9日, 九州工業大学天神サテライトキャンパス.

K. Shimada, T. Nishida, ''Particle Filter-Model Predictive Control of Quadcopter'', Proc. of International Conference on Advanced Mechatronic Systems, pp. 421-424, 2014年8月11日, 東海大学熊本キャンパス.

島田, 津上, 西田, ''クアッドコプタのパーティクルフィルタモデル予測制御,'' 日本ロボット学会学術講演会, 2014年7月4日, 琉球大学.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)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