

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	パラメータ不確かさを有する非線形システムにおけるロバスト状態推定に関する研究
Title(English)	Study of robust state estimation for nonlinear systems with parameter uncertainties
著者(和文)	石原新士
Author(English)	Shinji Ishihara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10632号, 授与年月日:2017年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山北 昌毅,三平 満司,倉林 大輔,早川 朋久,大山 真司
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10632号, Conferred date:2017/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	石原新士	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	山北昌毅	准教授	大山真司	准教授
	審査員	三平満司	教授		
		倉林大輔	教授		
早川朋久		准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「パラメータ不確かさを有する非線形システムにおけるロバスト状態推定に関する研究」と題し、全7章より成っている。

第1章「序論」では、論文の全体としての研究背景と目的について、先行研究との対比を行いながら述べている。

第2章「事前知識」では、本論文に関係する事前知識として、線形システムにおける最適推定器であるカルマンフィルタについて説明している。また、カルマンフィルタを非線形システムに適用する手法として、いくつかの非線形カルマンフィルタについて述べている。まず、産業界でも広く利用されている拡張カルマンフィルタ (EKF) について述べている。つぎに、非線形性が強く EKF では扱うことが困難なシステムに有用であるアンセンテッドカルマンフィルタ (UKF) について述べ、また、統計的な性質を近似するという観点で UKF と類似する等価線形化フィルタ (EqKF) について述べている。

第3章「離散時間非線形ロバストフィルタ」では、パラメータ不確かさを有する非線形システムを対象とした非線形ロバストフィルタの提案を行なっている。まず、EKF の考え方に基づき、非線形システムを Taylor 展開によって線形近似したシステムを用い、パラメータ不確かさが状態量の推定誤差共分散行列に与える影響を解析している。この解析結果に基づき、パラメータ不確かさの影響を考慮した推定誤差共分散行列を最小化するロバスト拡張カルマンフィルタ (REKF) を提案している。つぎに、U 変換を利用して近似線形システムを導出し、この近似線形化システムについて、REKF と同様の解析を行うことでロバスト UKF (RUKF) を提案している。その後、等価線形化フィルタの考え方をを用いて、REKF と RUKF を統一した形で表現し、非線形ロバストフィルタ (RNF) を提案している。さらに、観測誤差共分散行列を利用した適応則を用いることでパラメータ不確かさの影響を自動的に調整する、非線形適応ロバストフィルタ (ARNF) の提案を行っている。提案した手法の有効性を検証するために、それぞれの手法を誘導モータモデルの数値シミュレーションに適用し、RNF や ARNF の有効性を示している。

第4章「連続・離散非線形ロバストフィルタ」では、3章で提案を行った離散時間システムの非線形ロバストフィルタを連続・離散時間システムに適用できるように拡張を行っている。まず、離散時間システムのカルマンフィルタを連続時間システムに拡張する手法に従って、離散時間システムで導出した REKF を連続・離散システムに適用できるように拡張することで、連続・離散

REKF (CD-REKF) を導出している。つぎに、離散時間システムの RUKF を連続離散システムに拡張するために、行列表現を用いた RUKF を導出し、Sarkka が提案した連続・離散 UKF の導出手法に従って、行列表現を利用した RUKF を連続・離散 RUFK (CD-RUKF) を提案している。さらに、CD-REKF, CD-RUKF はともにその更新式が離散時間系に従うため、3章で提案した適応則をそのまま利用することができることを示している。提案した手法の有効性を検証するために、二相永久磁石同期モータや台車・振り子系モデルの状態推定数値シミュレーションを行い良好な結果が得られることを示している。

第5章「近似最小分散不偏フィルタ」では、非線形ロバストフィルタの導出時に利用する線形近似システムの推定誤差期待値のダイナミクスに注目し、未知パラメータが状態量の推定値に影響を与えない条件を導出し、この拘束条件を利用した最適化問題を解くことで近似的に最小分散不偏推定を実現する、近似最小分散不偏フィルタを提案している。さらに、ここで考える最適化問題はラグランジュの未定乗数法を利用することで解析解を求めることができるため、通常非線形カルマンフィルタと比べても計算負荷の増加を抑制できることを示している。提案した手法の有効性を検証するために、3章で扱った誘導モータモデルに対する数値シミュレーションを行い、提案した近似最小分散不変フィルタを用いることで、未知パラメータの影響を受けず良好な推定結果が得られることを示している。更に、未知パラメータを陽に推定する場合でも、パラメータ推定誤差の影響を受けずに状態が精度良く推定できることを示している。

第6章「ロバスト近似最小分散不偏フィルタ」では、パラメータ不確かさに加え、5章で提案した近似最小分散不偏フィルタの導出過程において十分考慮していなかった線形化誤差を陽に考慮し、状態量の予測誤差共分散行列を計算することで近似最小分散不偏フィルタをロバスト化した手法であるロバスト近似最小分散不偏フィルタを提案している。提案手法の有効性は前章でも用いた誘導モータモデルの数値シミュレーションを行い、パラメータの不確かさや初期推定の誤差に対して状態量をロバストに推定できることを示している。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果の総括と、研究の今後の課題と発展などについて述べている。

以上を要するに、本論文は、システムのパラメータに不確かさを含む場合の状態ならびにパラメータの推定法を提案し、その有効性を示したもので、工学上・工業上寄与するところ大である。よって本論文は、博士（工学）論文として十分価値あるものと認められる。