

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18088

研究課題名(和文) 制御系のレジリエンスを評価・保証する確率的手法の構築

研究課題名(英文) Probabilistic Approach to Analysis and Synthesis of Resilient Control Systems

研究代表者

和田 孝之(WADA, Takayuki)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：60599207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では制御システムが情報システムとリンクされたため、制御システムの不確定要因に対する頑健性が要求されることを動機に、確率的手法をベースとしたレジリエンスを保証する制御系設計や解析の手法を構築することを目指して研究を行った。第一歩として、不確定要因の存在下においても頑健に動作するアルゴリズム：確率近似法を取り上げ、その性能解析を与えた。また、雑音存在下でのシステム同定理論について研究を行った。モデルパラメータの存在領域は不確定要因の影響を受け、領域が非連結となることがあるが、制御器設計には不都合である。そこで、連結な推定領域が求まるよう、データを事前に整形するアイデアを示した。

研究成果の概要(英文)：Probabilistic approaches to realization of resilient control systems were considered. We first provided a stopping rule of stochastic approximation procedures which is a typical method for solving unknown nonlinear equations or optimization based on its measurement of residual of equations or objective function value. A key idea is to provide a relationship between the number of iterations and estimation error of a solution candidate. Furthermore, an identification method which is called Leave-out Sign-dominant Correlation Regions (LSCR) algorithm is considered. This method finds a non-asymptotic confidence region for the parameters of a plant model. We proposed a construction of a connected confidence region for the parameters of an AR models. A key idea is to employ the prediction error of model output directly. Since the error function is monotone with respect to each parameter, it always leads to a connected confidence region for a class of the models.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 システム工学 数理工学 アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

制御系には、様々な不確定要因があるため、設計された制御系にも不確定性が存在する。制御工学では、この不確定性の影響を、対象システムのモデル集合を考え、その集合すべてについて制御仕様を満足するか、否かで測る。これにより、一度動き始めた制御系は不確定要因が想定範囲内であれば、絶対に停止しないことを保証する。これが、制御系の解析・設計において、不確定要因の影響のある・なしを測る指標であり、ロバスト性とよばれ、様々な制御系の性能解析・設計のための理論が構築され体系化されている。

一方、情報システム、特に、分散システムは、システムの一部が故障したとしても、データの一貫性を保つことなどが要求されるため、制御システムと同様に、不確定要因の影響を評価しその影響を低減化することが重要である。そして、情報システムにおいては、システムが絶対にダウンしないことを保証する信頼性、平均的なシステムの利用可能率を保証する可用性、データの無矛盾性を保証する完全性など複数の性質によって、システムが不確定要因から影響を受けるか・受けられないかが特徴付けられている。

これまで、一度動き始めたシステムが想定範囲内の外乱やダイナミクスの変動であれば、絶対に暴走や停止をしないことを評価・保証するロバスト性が制御系の解析・設計理論において重要な位置を占め、精力的に理論が体系化されてきた。しかし、近年の制御システムは、情報システムとリンクされつつあり、制御システムの頑健性がこれだけで特徴付けられるわけではない。従来のロバスト性だけにとどまらず、情報システムが持つべき、信頼性、可用性、完全性などを評価・実現するレジリエンスな制御系のための理論が必要である。これは、安全性の面から見ても、実際、従来情報システムのみを対象としていたコンピュータウィルスの中に、Stuxnetのように制御システムを対象とするものがあらわれている。つまり、制御システムに対するセキュリティの必要性が高まっており、サイバーセキュリティという側面での研究も重要である。よって、ロバスト性にとどまらない制御システムの頑健さの指標について明らかにするが重要である。

<引用文献>

- K. Zhou, J. Doyle, and K. Glover, Robust and Optimal Control Prentice Hall (1995)
 N. Lynch Distributed Algorithms Morgan Kaufmann (1997)
 A. Avizienis, J-C. Laprie, B. Randell, and C. Landwehr, Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing

IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol. 1, No. 1, pp. 11-33 (2014)

N. Falliere, L. Murchu, and E. Chen W32.stuxnet Dossier, Version 1.3 Symantec (2010)

2. 研究の目的

本研究の目的は、これらの性質を解析・設計するための制御理論の基礎を申請者が持っている確率的手法に関する知見をベースに構築することである。実際、不確定さを確率変数として取り扱うことは自然であり、これらの手法は、制御系のロバスト性解析・制御系設計に応用され大きな成果をあげた。申請者は、確率的手法に関する知見が、それらを取り扱う基盤となると考えており、既に持っている

1. 確率的雑音の影響を受けるアルゴリズムの性能解析
2. アルゴリズムの実行過程であえてランダム性を付加するランダムイズドアルゴリズムとそれを用いた制御系の解析・設計手法。

に関する知見を活用する。これは、科学研究費補助金若手研究(B)平成 24 年度～平成 26 年度の研究課題「確率近似法の停止則」への取り組みならびに、2007 年度から 2 年間日本学術振興会特別研究員 (DC2, PD) として、研究課題「ランダムイズドアルゴリズムによるロバスト最適化とその制御系設計への応用」に取り組んだ成果である。

<引用文献>

R. Tempo, G. Calafiore, and F. Dabbene Probabilistic Optimal Estimation with Uniformly Distributed Noise Springer, 2nd edition (2013)

3. 研究の方法

本研究では、情報システムに対して用いられてきたシステムの頑健性を特徴付ける性質、システムが正常に動作する平均時間を保証する可用性や、データの一致性を保証する完全性などと制御系の解析・設計問題の関わりを確認することにある。そのために、具体的な解析・設計問題を複数取り扱い、検討を行う。その中で、情報システムとリンクされつつある制御システムが、レジリエントであるためには、どのような性質が必要かを検討する。これらの取り組みを通して、制御理論の中でシステムがレジリエントであるということに対して、理論的特徴付けを与えることが本研究の目標である。また、これらの性質を個々に実現する上で、申請者が有している確率論的手法が重要なツールとなると考えた。上記の問題に対して、具体的な問題を考え、それら小さな問題に対する研究を通してこれまでの研究で欠けている部分を探し、体系的な理論を構築する上での萌芽的な成

果を出すことを意図した。

4. 研究成果

本研究課題の遂行を通して得られた研究成果を以下にまとめる。

(1) 確率近似法の停止則

確率近似法とは、確率的雑音が含まれる残差の情報から未知方程式の解を、逐次的に求めるアルゴリズムである。回帰分析や動的システムモデルのパラメータを入出力データから推定するシステム同定、システムの状態を推定など、不確定環境のもとで動作するあるアルゴリズムの基礎となる考え方であり、解へと概収束の意味で収束する強い性質をもつ。そのため提案以来、様々な研究が進められており、そのアイデアは近年マルチエージェント系の制御へも開かれるなど、いまなお研究が進められている。確率近似法は反復解法であり、無限に反復すれば解が得られることが分かっており、多くの研究が概収束のためのよりシャープな十分条件の導出などを行っている。一方、実際に無限に反復を行うことはできない。そのため、有限回の反復でアルゴリズムを停止させる必要があるが、その際どのような基準を満たせば、所望の解が得られていると判断し、アルゴリズムを停止させてもよいだろうか。この問いのもと、本研究では、反復回数と解候補が真の解にどれだけ近くなるかの関係をアルゴリズムの実行前に陽に与えた。そして、これを用いて、アルゴリズムの反復回数をどう設定すればよいかの指針を与え、収束の早さについて一つの評価を与えた。これらの結果は、標準的な確率近似法に対する停止則（国際誌5. 雑誌論文）と、未知の目的関数をもつ最適化問題に確率近似法を適用する場合の停止則（国際誌5. 雑誌論文）に掲載されている。また、本研究成果を他の研究者が提案している事後情報のみを利用する停止則と比較した解説記事5. をまとめ、本研究成果について広く発信に努めた。また、本研究プロジェクトの研究ではないが、ここでの研究成果を元に、筆者は、通信雑音の存在下におけるマルチエージェント系の合意制御に展開することで研究成果を得ている（4. など）。

(2) 非凸ロバスト最適化問題に対する確率的解法

ロバスト最適化問題とは、集合として与えられる制約条件すべてを満足しつつ、目的関数を最適化する数理計画問題である。この定式化により、様々な問題を記述することができるものの、風力発電や太陽発電を大量導入した電力系の最適運用計画を立案する場合などは、再生可能エネルギーの発電量に依存して制約条件が変動することに加えて、覚醒約条件が非凸な最適化問題を扱わなければならない。申請者は、この問題に対する萌芽的な研究成果として、文献において、パラ

メータのランダムサンプルのみをもちいて、この問題に対する確率的保証をもつ解法を与えていた。しかし、問題のサイズが大きくなった場合などには、ランダムサンプルだけではなく、勾配法などを併用してアルゴリズムを構成することが、アルゴリズムの実用的な計算時間の意味から有用である。この点について、ロバスト BMI 最適化問題を対象に、実際にアルゴリズムを開発し、数値実験を行った（5. 雑誌論文）。ここでは一般的な問題を取り扱った。今後は制御問題を限定し、その制御問題の構造を利用した効率的なアルゴリズムを考えることが課題である。

(3) 観測雑音にロバストなシステム同定アルゴリズム

制御系の解析・設計を行うためには数式モデルが必要である。そのため、観測データから動的モデルを推定するシステム同定アルゴリズムは制御系の設計において非常に重要である。しかし、観測データが雑音を含んでいる場合、システム同定アルゴリズムによって得られた数式モデルの品質をどのように保証するかが問題となる。ここで、観測された入出力データから、対象システムのモデルパラメータの真値が高い確率で存在する集合を導出すると、この集合が連結でない状況が多々発生してしまうことが問題である。なぜなら、この推定されたパラメータの存在領域を制御対象がもつ不確実性と解釈するとき、ロバスト制御系の解析・設計手法は非連結な集合を取り扱うことを苦手としているためである。そこで、連結な集合が求まるよう、データを事前に整形するアイデアを示し、数値シミュレーションにて、実際に連結なパラメータの推定領域が得られることを確認した（学会発表）。

<引用文献>

- R. Morita, T. Wada, I. Masubuchi, T. Asai, and Y. Fujisaki
Multi-Agent Consensus with Noisy Communication: Stopping Rules Based on Network Graphs
IEEE Transactions on Control of Network Systems
Vol.3, No.4, pp.358-365 (2016)
DOI: 10.1109/TCNS.2015.2481119
- R. Morita, T. Wada, I. Masubuchi, T. Asai, and Y. Fujisaki
Time Averaging Algorithms with Stopping Rules for Multi-Agent Consensus with Noisy Communication
Asian Journal of Control
Vol.18, No.6, pp.1969-1982 (2016)
DOI: 10.1002/asjc.1349
- T. Wada, R. Morita, T. Asai, I. Masubuchi, and Y. Fujisaki
A Randomized Algorithm for Chance Constrained Optimal Power Flow with

Renewables
SICE Journal of Control, Measurement,
and System Integration
Vol.10, No.4, pp.303-309 (2017)
DOI: 10.9746/jcmsi.10.303

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者
該当なし

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)

(4)研究協力者
該当なし

[雑誌論文](計4件)

和田孝之, 藤崎泰正

確率近似法の停止則
システム/制御/情報, 査読有
Vol.62, No.5, pp.387-388 (2018)

Takayuki Wada and Yasumasa Fujisaki

A Randomized Algorithms for Robust BMI
Optimization
Proceedings of the 48th International
Symposium on Stochastic Systems Theory
and Its Applications, 査読有
pp.111-115, Fukuoka Institute of
Technology, Fukuoka, JAPAN (2017)
DOI:10.5687/sss.2017.111

Takayuki Wada and Yasumasa Fujisaki

Stopping Rules for Optimization Based on
Stochastic Approximation
Journal of Optimization Theory and
Applications, 査読有
Vol.169, No.2, pp.568-586 (2016)
DOI: 10.1007/s10957-015-0808-7

Takayuki Wada and Yasumasa Fujisaki

Stopping Rules of Stochastic
Approximation
Automatica, 査読有
Vol.60, pp.1-6 (2015)
DOI: 10.1016/j.automatica.2015.06.029

[学会発表](計1件)

和田孝之, 北條智大, 藤崎泰正

自己回帰モデル同定における連結性を考
慮した非漸近的な信頼領域
第61回システム制御情報学会研究発表講
演会
146-6, 京都, 京都 (2017)

[その他]

ホームページ等

<http://www-door.ist.osaka-u.ac.jp/t-wada/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田 孝之 (WADA, Takayuki)

大阪大学・大学院情報科学研究科情報数理
学専攻・准教授

研究者番号: 60599207