

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04547

研究課題名（和文）ディペンダビリティを実現する大規模システム制御理論の構築

研究課題名（英文）Development of Control Theory for Achieving Dependability in Large-Scale Systems

研究代表者

藤崎 泰正 (Fujisaki, Yasumasa)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：30238555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ディペンダビリティを実現するための大規模システム制御理論の構築に関して、基礎と応用の両面より研究を行った。まず、大規模な動的システムを対象に、ディペンダブルな制御性能を保證可能な分散協調適応追従制御の構成法をまとめた。さらに、大規模な線形方程式の分散解法への応用を想定した確率近似法の収束条件を導出した。一方、ソーシャルネットワークにおける合意形成の数理モデルであるオピニオンダイナミクスを対象に、ネットワーク構造や意見交換のグループサイズと合意形成の関係について解析し、平均的なふるまいを支配するパラメータを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ネットワーク化された大規模な動的システムやネットワーク上の分散反復アルゴリズムのいくつかを対象に、ディペンダビリティ（信頼性）を解析・設計するための基礎理論を構築した。対象のダイナミクスやネットワーク構造を適切な数理モデルを用いてシステム表現することにより、大規模システムや分散アルゴリズムのディペンダビリティについて数理的に解析することができ、性能保証をもつ制御系が設計できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This research investigated the dependability of large-scale control systems from both theoretical and application viewpoints. A distributed cooperative adaptive tracking control was developed for large-scale dynamical systems, where a dependable control performance is ensured. Furthermore, a convergence condition was established for a class of probabilistic approximation which is useful for solving large-scale linear equations in a distributed way. Regarding opinion dynamics, which is a mathematical model representing consensus formation in social networks, an analysis was conducted on the relationship between network structure, group size of opinion exchange, and consensus formation, where a parameter governing average behavior was clarified.

研究分野：工学

キーワード：制御工学 数理工学 アルゴリズム モデル化 ディペンダブル・コンピューティング

1. 研究開始当初の背景

インターネットを通じて膨大な数の機器を接続し制御することが当たり前になりつつある現在、多数の構成要素よりなるネットワーク化されたシステムを対象とする制御理論の充実が喫緊の課題である。特に、サブシステム数の増加に対応し得るスケーラビリティと、システムの特異変動やノイズなどの不確かさに対処し得るロバスト性をあわせもつように、制御理論を再構築する必要がある。

通常の規模のシステムにおけるロバスト性の実現については、これまでの制御理論でも種々の角度から取り上げられてきた。例えば、1960年代に集中的に研究されたLQG制御では、制御システムにおけるノイズを不確かさとして取り上げ、制御性能への影響を最小化するものであった。そこではガウス性白色雑音を考察対象とし、平均や分散を用いて不確かさをスカラー化して取り扱っている。また、1980年代より研究が盛んになったロバスト制御では、制御システム自身の不確かさを対象に、その制御性能へ与える影響の最小化を目指している。ここでは、モデルパラメータの変動を主な考察対象とし、パラメータの集合で不確かさを表現している。

これらに対して、2000年以降、集中的に研究が行われ、成果が結実しつつある確率的ロバスト性解析・設計では、モデルパラメータやノイズなどの不確かさの集合の上に確率測度を導入している。これにより、不確かさの表現力が増すのみならず、導入した確率測度に従って不確かさをランダムサンプルして用いるようなランダムイズドアルゴリズムや確率的解析を構築することにより、従来手法の限界を乗り越えることができる。実際、応募者らは、このような確率的アプローチの研究を進める中で、以下を明らかにして来た(例えば、解説記事「ランダムイズドアルゴリズムによる制御システムの解析と設計」(藤崎・大石, システム/制御/情報, 53, 189/196, 2009)、「ロバスト凸最適化のためのランダムイズドアルゴリズム」(藤崎・和田, 計測と制御, 50, 950/955, 2011)、「確率近似の停止則」(和田・藤崎, システム/制御/情報, 62, 188/193, 2018)などを参照)。(a) パラメトリック不確かさをもつシステムのロバスト最適制御など、取り扱うべき不確かなパラメータ数に対してNP困難な複雑さをもつ制御問題であっても、ランダムイズドアルゴリズムにより確率的な意味で厳密に解くことができる。(b) 不確かさなどのパラメータ集合に導入する確率測度は、正規分布でなくてもよい。(c) ランダムイズドアルゴリズムを用いる場合、不確かさ・複雑さをもつ制御問題を、凸化や低次元化により単純化することなく、本来のパラメータ構造のまま取り扱うことができる。(d) このようなランダムイズドアルゴリズムで必要となるランダムサンプル数、計算量は、ともに問題サイズの多項式であり、効率的な解法である。(e) ランダムイズドアルゴリズムが見つかることのできる解は、事前に指定された確率で設計条件を満たすものであり、予め指定されたリスク以内で、アルゴリズムはそのような解を出力する。このとき、解の精度を与えるパラメータと解のリスクを与えるパラメータは、設計者自らが指定できる。つまり、解の精度と信頼度を定量的に設計可能である。

2. 研究の目的

本研究課題「ディペンダビリティを実現する大規模システム制御理論の構築」は、複雑なシステムを合理的な計算量で解析・設計できるという確率的アプローチの特徴に着目し、応募者らのこれまでの研究成果を、現代の高度にネットワーク化された大規模システム制御における基本的課題であるディペンダビリティ(高信頼性)の実現、スケーラビリティとロバスト性の両立を解決するものへと発展させることを目指している。そのために、確率的アプローチと計算科学分野における分散情報処理システムのディペンダビリティ実現技法の融合をはかり、大規模システム制御理論を現代的な課題に応えるものとして再構築するべく研究を行った。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、以下に示す観点で課題を整理し、理論研究を行った。

(1) ディペンダビリティの基礎

大規模システムのネットワーク構造の解析や、新たなランダムイズドアルゴリズム・確率的解析法の開発を通して、ディペンダビリティ解析・設計手法を確立することを目指した。特に、ネットワーク化された制御システムの解析・設計における基本課題であるディペンダビリティを実現しやすいネットワーク構造について検討するとともに、ネットワーク接続されたシステムの協調動作で鍵となる分散アルゴリズムや分散制御系の性能を解析する手法について、いくつかの切り口から理論研究を行った。

(2) ディペンダビリティの応用

実用的な大規模システムの制御問題を対象に、確率的解析の適用方法を具体的に検討することを通して、ディペンダビリティ解析・設計手法を確立することを目指した。特に、多数のサブシステム(エージェント)より構成される大規模システムを対象としたスケーラブルな解析手法やロバストな制御手法を検討するとともに、大規模で複雑なソーシャルネットワークにおける合意形成の数理モデルであるオピニオンダイナミクスを対象に、ネットワーク構造や意見交換のグループサイズと合意形成の関係等について研究を行った。

4. 研究成果

本研究課題により得られた成果は、年度毎に以下のようにまとめることができる。

(1) 計画1年目(2020年度)

初年度は、ディペンダビリティの基礎に関する課題整理と資料収集を進めつつ、ディペンダビリティの応用面からの研究を展開した。まず、ソーシャルネットワークにおける合意形成については、大規模で複雑なソーシャルネットワークにおける合意形成の数理モデルであるオピニオンダイナミクスを対象に、動的システム理論を援用してネットワーク構造や意見交換のグループサイズと合意形成の関係について解析し、平均的なふるまいを支配するパラメータを明らかにした(雑誌論文: Aguilar & Fujisaki, SICE JCMSI 2021)。また、マルチエージェントシステムのディペンダビリティ解析と制御については、多数の宇宙機より構成されるマルチエージェントシステムを対象に、リーダーとフォロワーのダイナミクスおよびそれらの間の情報交換についてロバストな協調制御則を提案した(学会発表: Pietrasanta, Capello & Fujisaki, SICE ISCS 2021)。また、これらの研究において、どのようなネットワーク構造がある種のシステムの解析や設計において有用かが明らかになった。

(2) 計画2年目(2021年度)

ディペンダビリティの応用面からの研究を継続しつつ、ディペンダビリティの基礎に関する研究を展開した。ここでは、分散最適化問題として、各エージェントの目的関数の和を最小化する問題を取り上げ、それを2種類の制約条件のもとで検討した(学会発表: 田中・藤崎、自動制御連合講演会 2021、SICE 制御部門マルチシンポ 2022)。一つは各エージェントの決定変数の和が一定であるという制約であり、もう一つは各エージェントの決定変数が一致するという制約である。前者は電力システムの経済負荷配分で現れる問題であり、後者はマルチエージェントシステムの分散最適化で取り上げられる問題である。このどちらに対しても、エージェント間の情報交換のネットワークが無向グラフで連結である限り、標準的な分散最適化アルゴリズムにモーメンタム項を導入することができ、最適解へ必ず収束することと、その収束の速さをモーメンタム項により調整できることを明らかにした。このことにより、どのようなネットワーク構造が分散アルゴリズムの構築に有用かの一端が明らかになった。

(3) 計画3年目(2022年度)

最終年度では、ディペンダビリティの基礎と応用の両面から、これまでの研究成果をまとめるとともに、新たな研究アイデアの発掘を行った。まず、分散アルゴリズムの性能保証に関しては、大規模な線形方程式を対象とするマルチパラメータをもつ確率近似法への応用を想定した新たな収束条件を導出した(雑誌論文: 福元・藤崎、ISCIE 論文誌 2023、学会発表: ISCIE 研究発表講演会 2022)。得られた条件は方程式の係数行列の対称性を要求しないものであり、確率近似法の適用範囲を種々の分散アルゴリズムへと広げることが可能にするものである。また、マルチエージェントシステムのディペンダビリティ解析と制御に関しては、制御性能を保証可能な分散適応追従制御の構成法をまとめた(雑誌論文: Gebremedhin & Fujisaki, SICE JCMSI 2022, Int. J. Adaptive Control and Signal Processing 2023)。ソーシャルネットワークにおける合意形成に関しては、オピニオンダイナミクスとして Friedkin-Johnsen モデルを取り上げ、Price of Anarchy の評価とその保守性を明らかにした(雑誌論文: 増田・藤崎、ISCIE 論文誌 2023、学会発表: 増田・藤崎、SICE 関西シンポ 2023)。さらに、ディペンダビリティの新たな解析ツールとしてシナリオアプローチに着目し、平均制約のもとでの最適化やスパース最適化への応用について、基礎的検討を行った(学会発表: Fujisaki & Hatanaka, SICE ISCS 2023、Zhang & Fujisaki, SICE ISCS 2023, IFAC WC 2023)。

以上のように、雑誌論文5件、学会発表8件を通して、本研究課題を実施して得られた成果の公表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Aguilar Emerico, Fujisaki Yasumasa	4. 巻 14
2. 論文標題 Reaching consensus via coordinated groups	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 20 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2021.1874673	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Gebremedhin Atsede G., Fujisaki Yasumasa	4. 巻 15
2. 論文標題 Distributed adaptive control for optimal tracking of uncertain interconnected dynamical systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 218 ~ 227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2022.2143634	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Gebremedhin Atsede G., Fujisaki Yasumasa	4. 巻 37
2. 論文標題 Distributed adaptive control for H-infinity tracking of uncertain interconnected dynamical systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Adaptive Control and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1102 ~ 1116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acs.3562	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 福元一真, 藤崎泰正	4. 巻 36
2. 論文標題 線形方程式に対する確率近似法の収束条件	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 99 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 増田真朋, 藤崎泰正	4. 巻 36
2. 論文標題 Friedkin-Johnsen モデルの均衡解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 田中俊也, 藤崎泰正
2. 発表標題 経済負荷配分のためのモーメンタム項をもつ連続時間分散アルゴリズム
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中俊也, 藤崎泰正
2. 発表標題 モーメンタム項をもつ Zero-Gradient-Sum アルゴリズムによる分散最適化
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rodolfo Pietrasanta, Elisa Capello, Yasumasa Fujisaki
2. 発表標題 Leader-Following Coordination of Heterogeneous Multi-Agent Systems Via Displacement Feedback
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasumasa Fujisaki, Takeshi Hatanaka
2. 発表標題 A Scenario Approach to Optimization with an Average Constraint
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zhicheng Zhang, Yasumasa Fujisaki
2. 発表標題 Sparse Feedback Control Realization Using a Dynamic Linear Compensator
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zhicheng Zhang, Yasumasa Fujisaki
2. 発表標題 Risk-Aware Sparse Predictive Control
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福元一真, 藤崎泰正
2. 発表標題 線形方程式に対する確率近似法の収束条件について
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田真朋, 藤崎泰正
2. 発表標題 Friedkin-Johnsen モデルの均衡について
3. 学会等名 2022年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
イタリア	トリノ工科大学		