

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06494

研究課題名(和文) 制御システムにおけるディペンダビリティの解析と設計

研究課題名(英文) Dependability Analysis and Design of Control Systems

研究代表者

藤崎 泰正 (FUJISAKI, Yasumasa)

大阪大学・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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：制御システムにおけるディペンダビリティの解析と設計に関して、基礎と応用の両面より研究を行った。まず、ネットワーク上でのモデルベース制御系を取り上げ、乗法的雑音のもとでの安定性解析手法を与えるとともに、安定化状態フィードバックの設計方法を導いた。また、ダイナミクスの変化に対応可能な動作データに基づくシステム表現と制御方式を、多重周期サンプリングデータを対象とするものに拡張した。さらに、ネットワーク化された多数の平行安定化コントローラの通信設計を研究し、制御系の安定性について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代の高度にネットワーク化された制御システムからいくつか例を選び、ディペンダビリティ(信頼性)を解析するための基礎理論を構築して、それを設計理論へと発展させた。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、制御系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、理論的保証をもつ制御系が設計できることを明らかにするとともに、その設計法も与えた。

研究成果の概要(英文)：Dependability analysis and design of control systems were investigated from both theoretical and application viewpoints. Stability analysis and stabilizing state feedback design were studied for model based networked control systems with multiplicative noise. A system representation and a control strategy based on multi-rate sampling data was developed, which achieves dependability for system dynamics change. Communication design of networked parallel stabilizing controllers was also studied, where stability of this control system is investigated.

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

制御理論の中心課題の一つは、動的システムを対象とした不確かさの科学を確立することである。ここでは、対象システムのもつ不確かさの影響の解析手法および不確かさの影響を小さくするための制御系の設計手法を構築することが目標になる。このとき、そのような理論構築の鍵となるのが、不確かさの数理的表現である。制御理論の歴史では、何を不確かさとして、それをどのように定式化するかによって、これまで種々の理論が構築されてきた。

例えば、現代制御理論が提案された1960年代に集中的に研究されたLQG制御理論では、制御システムに加わるノイズを不確かさと考え、それをガウス性白色雑音として定式化している。そして、ノイズや制御すべき信号の平均と分散に着目して不確かさの影響を定量化し、その解析手法およびノイズが制御性能へ与える影響を最小化するコントローラの設計手法を与えている。また、1980年代より研究が盛んになったロバスト制御理論では、制御システムのダイナミクスの不確かさを対象に、その制御性能へ与える影響を限定することを目指している。ここでは、システムの数理モデルのパラメータ変動を主な考察対象に、パラメータの集合を凸集合で近似し、不確かさを表現している。制御性能としては、ロバスト安定性やH<sub>∞</sub>ノルムが考察されてきた。

さらに、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(問題に適切な、正規分布とは限らない)確率測度を導入し、不確かさの表現力を高めている。そして、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、LQG制御理論や標準的なロバスト制御理論を補完する新たな視座を与えている(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)や「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)などを参照)。その特徴をいくつかまとめると、(a) 取り扱うべきパラメータ数に対してNP困難な(確定的な意味で厳密な解を実用的な時間内に求めることが期待できない)不確かさ・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解の精度と信頼度を指定した上で(確率的な意味で厳密に)解くことができること、(b) 不確かさ・複雑さを、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ったとしても、解析・設計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ことなどである。

制御理論では、上述のようにLQG制御理論、ロバスト制御理論、確率的ロバスト性解析・設計として不確かさの理論的取り扱いに関する知見が集積しつつある一方、ネットワークを介して合意や協調を実現する分散情報処理システムの研究においても、ディペンダビリティ(高信頼性)実現技法が研究されてきている。現代の高度にネットワーク化された制御システムを安定に運用するためには、制御理論にこれら分散情報処理システムの知見を取り入れ、拡充することが望まれる。本研究課題「制御システムにおけるディペンダビリティの解析と設計」は、研究代表者らのこれまでの制御理論、特に確率的アプローチやロバスト制御に関わる研究成果を、ネットワーク化された制御システムにおける課題に対処できるよう、分散情報処理システムのディペンダビリティ実現技法との融合をはかり、制御システムにおけるディペンダビリティの解析・設計手法として確立することを目指したものである。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、ランダムイズドアルゴリズムや確率的解析を中心とするロバスト性解析と設計に関する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制御システムにおける課題を解決するものへと発展させるべく、分散情報処理システムのディペンダビリティ実現技法との融合をはかり、制御システムにおけるディペンダビリティの解析・設計手法として確立することを目指した。特に、制御システムにおけるディペンダビリティの解析・設計のための理論構築を目標に、厳密な性能保証のある解析・設計手法の実現のための研究を行った。

## 3. 研究の方法

本研究の最終的な目標は、ネットワーク上での分散情報処理システムにおけるディペンダビリティの実現手法を参考に、ランダムイズドアルゴリズムや確率的解析などロバスト性解析と設計に関するこれまでの研究成果をさらに発展させ、基礎と応用の両面から研究を進めることにより、制御システムにおけるディペンダビリティの解析と設計手法を構築することである。この目標を達成するために、以下に示すような具体的な課題を設定し、理論研究を行った。

### (1) ディペンダビリティの基礎

確率的雑音のもとでのネットワークシステムの解析や、ランダムイズドアルゴリズムの解析手法の拡充を通して、ディペンダビリティ解析・設計手法の確立を目指した。設定した研究課題としては、ネットワーク化された制御システムの特徴付け(確率システムとしての安定性の解析や安定化制御則の設計)、分散アルゴリズムの性能保証の基礎となる確率近似法の停止則の体系化などである。

## (2) ディペンダビリティの応用

実用的な制御システムの設計問題を対象に、ディペンダビリティ解析・設計手法の確立を目指した。設定した研究課題としては、ネットワークを介して多数のシステムが協調動作するマルチエージェントシステムの安定性の解析と安定性を実現するためのネットワーク構造や情報交換方法の設計、動作データに基づくシステム表現や制御方式、動作データから最適制御則を直接導くアルゴリズムなどである。

## 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（平成29年度）

ディペンダビリティの基礎として、ディペンダブルなネットワーク化制御系の特徴付けに関する研究成果をまとめた。ここでは、ネットワーク上でのモデルベース制御系を取り上げ、乗法的雑音のもとでの安定性解析手法について研究した。そして、ネットワーク上でのデータ送信周期にあわせた制御系のリフティング表現を用いれば、それが自乗平均安定であるための必要十分条件を、線形行列不等式として導出できることを明らかにした。さらに、そのような自乗平均安定性を実現する状態フィードバックの設計方法として、安定化状態フィードバックが存在するための十分条件を、線形行列不等式として導出し、数値例により有効性を確認した（雑誌論文：鳥海・藤崎、SICE 論文集）。一方、ディペンダビリティの応用としては、動作データに基づく（ダイナミクスの変化に対応可能な）高信頼な制御方式の確立を目指し、同定と制御の統合の検討を進めた。ここでは、連続時間システムを対象に、動作データから直接最適レギュレータゲインを求めるアルゴリズムについて検討し、一般的な状態と入力のクロスタームを含む2次形式評価関数の設定のもとでもそのようなアルゴリズムが得られることを明らかにした（学会発表：Song and Fujisaki, SICE ISCS 2018）。

### (2) 計画2年目（平成30年度）

ディペンダビリティの基礎に関して、分散アルゴリズムの性能保証の基礎となる確率近似法の停止則について、解説をまとめた（雑誌論文：和田・藤崎、システム/制御/情報）。また、ディペンダビリティの応用については、計画1年目に萌芽的な研究成果が得られた同定と制御の統合について、さらに研究を進めた。ここでは、離散時間システムを対象に、動作データから直接最適レギュレータゲインを求めるアルゴリズムの構築を行った（学会発表：Song and Fujisaki, SICE AC 2018）。また、ビデオ撮影によるサンプリング周期の長い位置検出を用いる場合など、入力の更新周期と出力の観測周期が一致しない状況でも適用可能な、多重周期サンプリングデータに基づくシステム表現と制御方式について研究した。そして、いくつかのデータ空間を適切に定義すれば操作入力系列を入出力データから直接算出できること、その算出がデータ配列を係数とする線形行列不等式を制約条件とする最適化問題として記述できることを明らかにした（雑誌論文：可知・藤崎、SICE 論文集）。さらに、大規模システムのディペンダブル制御についても研究を開始し、ネットワーク化された同一のダイナミクスをもつ多数のパラレルコントローラによる制御系を対象に、協調動作を可能とする情報交換のチャンネル数とネットワーク構造について検討した（学会発表：Kubo and Fujisaki, SICE AC 2018）。

### (3) 計画3年目（令和元年度）

最終年度では、ディペンダビリティの応用を中心として、これまでの研究成果をまとめるとともに、新たなアイデアの発掘を行った。まず、昨年度研究を開始したネットワーク化された同一のダイナミクスをもつ多数のパラレルコントローラによる制御系を対象とする大規模システムのディペンダブル制御について、取り扱うことのできるネットワークのクラスを拡張しつつ、協調動作を可能とする情報交換のチャンネル数とネットワーク構造についての研究成果をまとめた。そこでは、コントローラ間の情報交換のネットワークが弱連結で平衡な有向グラフで記述される時、制御系の内部安定性を保持するような情報交換の方法が必ず存在すること、コントローラ自身のダイナミクスがある緩やかな条件を満たすとき、そのような情報交換が1チャンネルで可能となることを明らかにした（雑誌論文：Kubo and Fujisaki, IFAC PaperOnline）。また、大規模システムに対しては、その調整が分散的に行えるのみならず、調整のための精密なモデルが不要であることがディペンダビリティの向上に直結するとの考えから、反復アルゴリズムの一種であるモデルフリー調整法を、大規模システムに対して分散的に適用できるための条件について検討を行った。そして、ある種のM行列条件のもとで、そのような調整が実際に可能であることを、連続時間アルゴリズムおよび離散時間アルゴリズムについて明らかにするとともに、寄生ダイナミクスの存在が調整に与える影響を解析した（学会発表：伊藤・藤崎：SCI'19, 第62回自動制御連合講演会、SICE MSCS 2020）。

以上のように、雑誌論文4件、学会発表6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4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 可知怜也, 藤崎泰正	4. 巻 55
2. 論文標題 多重周期サンプリングデータに基づくシステム表現と制御方式	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 85-91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.85	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 和田孝之, 藤崎泰正	4. 巻 62
2. 論文標題 確率近似法の停止則	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 188-193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.62.5_188	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 鳥海 涉, 藤崎 泰正	4. 巻 53
2. 論文標題 ネットワーク上でのモデルベース制御系の乗法的雑音のもとでの安定性と安定化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 601 ~ 607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.53.601	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 Takamichi Kubo, Yasumasa Fujisaki	4. 巻 52
2. 論文標題 Communication design of networked parallel stabilizing controllers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 85-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2019.06.015	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takamichi Kubo, Yasumasa Fujisaki
2. 発表標題 Stabilization of a Closed-Loop System with Parallel Controllers and Communication
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qingquan Song, Yasumasa Fujisaki
2. 発表標題 Computational Adaptive Optimal Control for Discrete-Time Linear Unknown Systems via Quadratic Performance Index with Cross Products
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qingquan Song, Yasumasa Fujisaki
2. 発表標題 Computational Adaptive Optimal Control for Continuous-Time Linear Unknown Systems via Quadratic Performance Index with Cross Products
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤隆介, 藤崎泰正
2. 発表標題 大規模複合システムのモデルフリー調整法
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤隆介, 藤崎泰正
2. 発表標題 寄生ダイナミクスをもつ大規模複合システムのモデルフリー調整法
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤隆介, 藤崎泰正
2. 発表標題 大規模複合システムの離散時間モデルフリー調整法
3. 学会等名 計測自動制御学会第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----