

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2021
課題番号：18K04203
研究課題名(和文)ディペンダブル制御実現に向けた基礎理論の構築

研究課題名(英文)Fundamental theory for dependable control

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ディペンダブル制御実現に向けた基礎理論の構築のため、いくつかの制御問題を取り上げ、研究を行った。まず、センサネットワークによる動的システムの分散推定問題を取り上げ、センサノードの故障に強く、通信負荷の少ない推定アルゴリズムを検討した。また、多数のサブシステムからなる大規模分散システムにおいて、システム全体として達成したい制御目標を、どのようにサブシステムの制御目標に落としこむか考え、制御問題への応用を見据え、連続変数を取り扱うことができるよう拡張した。さらに、通信構造のスパース性と制御性能を両立する制御系の設計問題を考え、制約を考慮した制御手法について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御システムは通信ネットワークなど、情報システムを利用して構成されるため、制御の指標も従来の機械・電気システムを対象とした指標を超えたものが要請される。ここでは、いくつかの例を取り上げ、要求されるディペンダビリティに対応する指標が何かを考察した。また、ディペンダビリティを保証するために利用できる確率的な手法について再検討をおこない、ある程度大きなリスクを許容できる場合を対象に、従来手法より、より高精度にリスクを評価する方法を考えた。

研究成果の概要(英文)：To construct a fundamental theory for dependable control, we investigated several typical control problems in this research. We first studied distributed estimation of a dynamical system based on a sensor network. We proposed robust estimation algorithms for sensor failures and low communication load. We next considered how to define an objective function of each subsystem according to a given full system-level welfare function. We aim to apply it to control problems. We extend the conventional algorithm for discrete decision variables to that for continuous ones to achieve this goal. Furthermore, we investigated a control problem with constraints to achieve both the sparsity of the communication and the control performance.

研究分野：システム制御理論

キーワード：制御工学 システム工学 数理工学 ディペンダビリティ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

制御対象の数理モデルをもとにコントローラを設計する上で、制御対象のモデリングや設計、実装、運用などの各場面で様々な不確定性の影響を受ける。ロバスト制御理論は、この不確定性の影響を、対象システムがモデルの集合として記述し、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。このロバスト性とよばれる、制御系の解析・設計において、不確定要因の影響の大きさを測る尺度を利用し、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し、大きな成果を上げてきた。

ロバスト制御は大きな成功を収めたが、考慮すべき頑健さはロバスト性のみで十分であろうか？近年、WannaCryなどのコンピュータワームによるプラントが異常停止、ウクライナの電力システムのハッキングによる大規模停電などが発生している。これは、制御システムがネットワークに接続され、情報システムとしての性格を有しつつあるために発生した事象であり、モデリングや実装の際に、自然に混入する誤差だけを対象にしたロバスト性では対処できない。つまり、悪意をもつ第三者から情報を抜き取られ、意図しない動作をさせられないようにするため、計算機システムに要求される頑健さを備える必要がある。情報システム、特に、分散システムに要求される頑健さとして求められることは、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ち、動作することである。

2. 研究の目的

上述したように、情報システムに要求される頑健さは、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ち、動作することである。これは、制御システムにおけるロバスト性が目指す所と同じである。しかし、その頑健さを保証することの尺度は制御システムと異なっている。たとえば、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確保する可用性、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・受けないかを特徴付けており、それらをまとめてディペンダビリティと呼んでいる。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つつあるため、従来のロバスト性にとどまらず、情報システムが持つべきディペンダビリティを有する制御系を解析・構築することが研究の大きな目標である。

そこで、本研究の目的を、これらの性質を解析・設計するための制御理論の基礎を既に有している確率的手法に関する知見を活用し、理論構築を行うこととした。実際、不確定度合いを確率変数として取り扱うことは自然であり、制御システムについては、ロバスト性解析・制御系設計アルゴリズムに応用されてきた。情報システムにおいても、統計情報から個々人のデータの特長を防ぐために考えられた差分プライバシーは、公開する統計情報に雑音を付加することにより、一定の秘匿性を確保するため親和性は高いと予想した。

3. 研究の方法

本研究の最終目標は、制御システムを対象に

1. ディペンダビリティの定式化（何が変動するか。その変動に対して何を保証したいのか）
2. ディペンダビリティの解析手法（保証したい性質を有するシステムの特徴付けは何か）
3. ディペンダビリティの実現手法（どのような制御がディペンダビリティを保証するか）

を明らかにすることにある。例えば、電力システムにおいては、耐故障性やメンテナンス性、発電量の信頼性、中央からの発電調整への対応や、年平均での停電時間など、様々な意味での頑健性が要求される。第一歩として、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、データの一貫性を保証する完全性などを特定の制御系の解析・設計問題において、有用であるかを検証する。

4. 研究成果

本研究課題により得られた成果を、以下に年度ごとにまとめる。

研究初年度（2018年度）

研究初年度は、ディペンダブル制御の一つとして、センサネットワークにおいて、制御対象の状態を推定する機構を取り上げ、研究を行った。対象とした問題は、貧弱な機能しか持たないセンサを多数利用し、それらから得られる情報をどのように組み合わせればシステム全体の状態

を推定することができるかである。特に、センサネットワークに利用されるセンサは電池により駆動するものも多いと想定されるため、情報交換を間欠的に行ったとしても状態推定を達成できるかを問題とした。一つは各センサが同期して情報交換を行う場合、通信間隔をどのような条件を満たすように選べば良いかを明らかにし、漸近的に正確な状態推定を達成する通信間隔が必ず存在することを明らかにした（学会発表：Furukawa・Wada・Fujisaki：SICE AC'18）。さらに、非同期的に情報交換を行うより現実的な問題設定についても検討を進めた。そこでは、各センサが常に通信可能な場合に漸近的に正確な状態推定を可能とする推定器が構成できたならば、それをもとに非同期情報交換による状態推定を達成する推定器を構成可能なことを示した（学会発表：古川・和田・藤崎：SICE MSCS'19）。構成した推定器は、推定誤差が大きいと予想される場合に頻繁に情報交換を行い、推定精度が上がったと判断される場合にはあまり通信を行わないような推定機である。逆に前者は推定精度に依存せず常に一定時間間隔で情報交換を実施する。そのため、理論的な検討はできていないが、両者を組み合わせるのも有用ではないかと予想している。

研究2年度（2019年度）

研究2年度は、ディペンダビリティの解析手法として、ランダムイズドアルゴリズムの再検討をはじめた。こちらについては、従来の複雑な理論について、見通しをよくする解釈を与えることを目指しており、統計的仮説検定との関係を考察した（学会発表：和田・加嶋：連合'19）。これに加え、多数のサブシステムからなる大規模分散システムについて、システム全体での制御指標が与えられていたとしても、個々のサブシステムについて、性能指標を与えることは簡単ではない。この問題に対して、どのように個々のサブシステムの制御指標を設計すればよいかを検討した。得られた設計手法は、従来のものと同じ性能を持つにもかかわらず、計算手数が少ない（学会発表：真壁・和田・藤崎：SCI'19）。さらに、性能指標が凸関数である場合には、各サブシステムについて個々の情報のみで算出可能な性能指標で十分な性能を発揮することを示した（学会発表：真壁・和田・藤崎：SICE MSCS'20）。

研究3年度（2020年度）

研究3年度は、昨年度に続き、ゲーム理論に基づくディペンダブルな制御方策について研究を行った。多数のサブシステムからなる大規模分散システムについて、通信構造のスパース性と制御性能を両立する制御系の設計問題を考えた。通信量が少ないことは頑健さにつながる重要な性質である。まず、この問題の定式化を与え、それをもとに協力ゲームの提携形成問題を定式化した。結果として、考えた制御問題が協力ゲーム理論における標準的な問題として解釈可能であり、得られた提携を頑健なものとするために、協力ゲームの解の概念を利用することができることがわかった（学会発表：松山・和田・藤崎：SCI'20）。さらに、多数のサブシステムからなる大規模分散システムにおいて、システム全体として達成したい制御目標を、個々のサブシステムにどのようにかみ砕いて評価関数を与えればよいかという問題に取り組んだ。前年度の成果をまとめる（雑誌論文：Makabe, Wada, Fujisaki：IFAC WC'20）とともに、さらなる検討をおこなった。評価関数では、均衡解が存在した場合の、最悪ケースの解析結果を与えていた。本年度は、定義した評価関数を用いた場合、どのような意味での均衡解が存在し得るのかを明らかにした（学会発表：Makabe, Wada, Fujisaki：SSS'20）。また、これまでは離散変数の問題を取り扱っていたが、制御問題への適用を視野に、連続変数の場合へと拡張を検討した。結果として、システム全体の性能を表現している目的関数が、あるクラスの関数であれば、パラレルな拡張が可能であることを明らかにした（学会発表：真壁・和田・藤崎：SICE MSCS'21）。加えて、プライバシーの意味でディペンダブルな制御システムに関する研究を行った。差分プライバシーを用いる際には、出力する統計値の値域について陽に考慮することはないが、たとえば、多数の消費者の入札に基づいて決まる価格から、各消費者のプライバシーを保護したい場合、価格は正であることを陽に用いなければ適切なプライバシー保護は行えない。値域に制限のある中で、プライバシー保護を実現するために付与すべき雑音の性質について検討を行った（学会発表：和田：SICE MSCS'21）。

研究4年度（2021年度）

コロナ禍により、研究の打ち合わせ等をスムーズに実施することができなかつたため、当初の研究期間から一年延長し、研究を実施した。最終年度では、これまでの研究成果を雑誌論文としてまとめ（雑誌論文：真壁・和田・藤崎：ISCIE'22）、さらなる検討をおこなった。昨年度研究を開始したリアルタイムにサブシステムが提携関係を構成しつつ制御を行う制御手法について、制御性能と情報交換のトレードオフをはかる制御法については、制御入力や出力の制約条件を守り安全に制御を実施することを可能とする手法を提案した（学会発表：松山・和田・藤崎：SICE 関西'22）。また、研究2年度に実施したランダムイズドアルゴリズムの再検討について考察を進め、リスクを高く見積もっても良い場合に、従来の手法ではリスクの見積もりが厳しくなりすぎるため、より高精度にリスク評価を行う方法を考察した（学会発表：生野・和田・藤崎：SICE AC'22, SICE MSCS'22）また、初年度に取り上げた分散推定問題についても、各センサノードの通信をランダムに行うと、より簡便に実装できつつ、ロバスト性を確保できることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takayuki Wada, Ayumi Makabe, and Yasumasa Fujisaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Simple Utility Design for Welfare Games under Global Information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 16964-16970
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2020.12.1244	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 真壁あゆみ, 和田孝之, 藤崎泰正	4. 巻 35
2. 論文標題 分散厚生ゲームにおける Egalitarian Non-Separable Contribution に基づく効用関数の設計	5. 発行年 2022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 48/54
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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 和田孝之
2. 発表標題 プレイヤー間の共通知識を考慮した差分プライバシーを保证するメカニズム
3. 学会等名 第8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 2021年

1. 発表者名 真壁あゆみ
2. 発表標題 無限分散厚生ゲームにおける効用関数設計
3. 学会等名 第8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 2021年

1. 発表者名 Ayumi Makabe
2. 発表標題 Equilibrium on Distributed Welfare Games with Utility Function Based on Egalitarian Non-Separable Contribution
3. 学会等名 The 52nd International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真壁あゆみ
2. 発表標題 分散厚生ゲームにおける限界貢献度に基づく効用関数の設計
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 和田孝之
2. 発表標題 データ駆動アプローチにより設計された制御器のデータによる品質検証について
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 真壁あゆみ
2. 発表標題 凸な資源割当問題に対する情報交換不要なマルチエージェントシステムの設計
3. 学会等名 第7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 2020年

1. 発表者名 松山 公丞
2. 発表標題 マルチエージェント制御における干渉を考慮した提携構造
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Furukawa
2. 発表標題 Distributed Full-State Observers with Intermittent Communication for Continuous Time Linear Systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田 孝之
2. 発表標題 ランダムイズドアルゴリズム『超』入門
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田 孝之
2. 発表標題 線形連続時間システムに対する事象駆動型分散協調全状態オブザーバ
3. 学会等名 第6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 2019年

1. 発表者名 Keiichiro Shono
2. 発表標題 A Sequential Randomized Algorithm for Programs with Probabilistic Constraints: Sampling-and-Discarding Approach
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田孝之
2. 発表標題 シナリオアプローチによる機会制約問題の非可解性解析
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 松山 公丞
2. 発表標題 マルチエージェント制御における干渉と制約を考慮した協調制御
3. 学会等名 2021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 2022年

1. 発表者名 田中 孝弥
2. 発表標題 ゴシッププロトコルに基づく非同期分散オブザーバの収束性解析
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------