

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14700

研究課題名(和文) 確率的なダイナミクスを有する線形系に対するロバスト制御理論の高度化

研究課題名(英文) Sophistication of robust control theory for linear systems with stochastic dynamics

研究代表者

細江 陽平 (Hosoe, Yohei)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：50726411

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)：ダイナミクスが確率的であるような系(システム)を取り扱うことが可能な制御理論を、適用可能な制御対象のクラスの拡大、安定性以外の性能指標への対応、実用性の向上、という3つの観点から高度化した。より具体的には、マルコフ過程によりダイナミクスが定まる確率系の制御、 $H_2$ や $H_\infty$ 性能を考慮可能な条件式の導出、出力フィードバック制御器の設計等について検討し、成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御理論の適用が望まれる対象は近年の計算機性能の向上にともなって多様化しており、確率的なダイナミクスを考慮可能な制御理論のニーズも今後確実に高まると考えられる。本研究の成果は、そのようなニーズに応えるための一助になると期待される。本研究で開発した確率制御理論は統計学的なアプローチとの相性がよいと考えられ、そのような方向性での活用にも期待している。

研究成果の概要(英文)：The control theory for systems with stochastic dynamics was sophisticated from the viewpoints of applicable classes of plants, use of performance indices other than stability, and improvement of practicality. More specifically, results were obtained, e.g., about control of systems with dynamics determined by a Markov process, derivation of inequality conditions for  $H_2$  and  $H_\infty$  performance, and synthesis of output feedback controllers.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 確率系 線形行列不等式 確率的動特性 不確かさ 出力フィードバック データ同化 機械学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

何らかの制御理論に基づいて実システムを制御しようと試みる際、まずはそのモデルを求めるのが一般的である。とくに、モデル化において確率的要素の影響が無視できず、かつ単に確率的な外乱入力を想定するのではシステム表現として不十分である場合には、ダイナミクス自体が確率的であるような系をモデルとして扱うことが望ましい。そのような確率的なダイナミクスを有する系は、しばしばランダムダイナミカルシステムと呼ばれる。ランダムダイナミカルシステムは、システム解析論の観点からその性質の解明が進められている。一方、その系はシステム表現が高度な確率論に基づいているため、汎用的かつ実用的な制御理論を構築することのハードルが高く、そのような方向性の研究は数が限られているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、制御対象を離散時間かつ線形なランダムダイナミカルシステム(以下、単に確率系)のクラスに限定した上で、制御工学の観点からその解析・設計を論じることを考える。このような限定のもとでは、確率系を制御問題において比較の見通しよく取り扱うことが可能であり、また現代の標準的な計算機環境によって現実的な速さで様々な制御問題を解くことが可能である。制御理論の適用が望まれる対象は近年の計算機性能の向上にともなって多様化しており、確率的なダイナミクスを考慮可能な制御理論のニーズも今後確実に高まると考えられる。そのようなニーズに応えられるよう、理論を整備することが本研究の究極的な目標である。本課題ではとくに、適用可能な制御対象のクラスの拡大、安定性以外の性能指標への対応、実用性の向上、という3つの観点から既存理論の高度化を図ることで、その有用性を高めることを主目的とする。

### 3. 研究の方法

適用可能な制御対象のクラスの拡大、安定性以外の性能指標への対応、実用性の向上、という3つの観点から既存理論を高度化する。当初計画における具体的な方法は以下の通りである。

(1) 適用可能な制御対象のクラスを拡大するため、時間に関して独立でない確率過程として、現時刻での値のみに依存して次時刻の条件付き分布が定まるマルコフ過程を考える。そして、その確率過程に依存したランダム行列を介してダイナミクスが定まる線形確率系のロバスト安定化制御について研究する。その大まかな流れは以下の通りである。まず、不確かさがなく(したがってマルコフ過程の値が決まればただちに値が定まる)ランダム行列に関して上記系が安定であるための十分条件を不等式条件として導出する。次に、上記ランダム行列が確率的ポリトープに属する範囲で不確かである場合を想定し、上記不等式条件を拡張して、系がロバスト安定であるための十分条件を導出する。その際、確率的ポリトープの有限数の端点のみを用いて確率的ポリトープに属する無数のランダム行列を尽くしたロバスト安定解析が可能な不等式条件を導く。そして、得られたロバスト安定解析のための不等式条件を、変数変換等の手法を用いることで設計のための条件式へ拡張し、統計的手法および凸最適化手法を用いたロバスト安定化状態フィードバック設計法を整備する。

(2) 安定性以外の性能指標として、 $H_2$ 性能を取り上げる。そして、閉ループ系がロバスト安定になる範囲において、その系の外乱入力から制御出力までの $H_2$ ノルムを極力小さくするようなロバスト $H_2$ 性能状態フィードバック制御器を設計する方法について研究する。確定系に関する議論とは異なり、確率系に対しては一般に $H_2$ ノルムの定義を複数通り考えることができる。本研究ではその中から、(時不変)確定系の $H_2$ ノルムがインパルス応答の二乗和の平方根に一致することを参考に、“インパルス応答の二乗和の期待値の平方根”を確率系の $H_2$ ノルムとして採用する。本課題ではまず、そのような定義のもとでの確率系の $H_2$ ノルムを解析するための条件式を導出する。そして、それを状態フィードバック設計のための条件式へ拡張し、ロバスト安定性だけでなく $H_2$ 性能も考慮に入れて制御器を設計することが可能な手法を整備する。

(3) 理論の実用性を向上するため、状態を直接測定することが困難な確率系に対しても適用することができるような制御器を構成するための方法を研究する。上記(1)、(2)を通して単純に導かれる条件式は状態フィードバック制御器を設計するためのものであり、状態が測定できない場合にはそれらをそのまま用いることはできない。そこで本研究では、既存の研究を参考に、確率系に対してオブザーバ(状態推定器)や出力フィードバック制御器を設計できないか検討する。

#### 4. 研究成果

本研究で扱う確率系の内部状態の遷移は、係数行列がランダム行列で与えられる状態方程式によって記述される。また、そのランダム行列が時間に関して独立同分布に従う場合には、対応する系の安定性を特徴づける条件式(リアプノフ不等式と呼ばれる)を比較的容易に導出できることが明らかになっている。以上のことを踏まえ、得られた成果を年度ごとに整理して記す。

(1) 2017年度は主として、上記安定条件を、ランダム行列が時間に関して独立同分布に従うのではなく、マルコフ性をもつ場合にも扱えるものに拡張することについて検討した。マルコフ性をもつ確率過程(すなわちマルコフ過程)は現時刻での値のみに依存して次時刻の条件付き分布が定まる。よって、安定条件を導出する際に通常の期待値操作を用いるのではなく、条件付き期待値を用いることを考えれば、その性質を活用できる可能性がある。そのような考え方に基づいて条件式の形やその変形等について検討を重ね、最終的にマルコフ過程依存の確率系に対する安定条件を導出することに成功した。また、確率系の動特性を決めるランダム行列がランダムポリティープで表される不確かさをもつ場合に、上記安定条件をロバスト安定条件へ拡張できることを示した。そのロバスト安定条件はロバスト安定化制御器設計のための条件式へさらに拡張することが可能である。これらの成果より、より広いクラスの確率系に対して、ロバスト安定解析や制御器設計を行うことが可能になった。

(2) 2018年度は、フランスの研究所へ長期出張し、主として確率系の出力フィードバック制御について研究を行った。申請者の制御理論では従来、確率系(動特性が確率的であるようなシステム)の内部状態が測定できない場合には安定化を達成することが難しいという問題があったが、そのような場合にも、測定可能な出力のみを用いて安定化を達成する方法を2つ検討した。1つは、出力フィードバック制御器を設計できるような理論を整備するという正攻法に関するもので、制御器が静的な場合についてそのような設計を可能にする条件式を導くことができた。またもう1つは、状態推定手法と申請者の確率系制御理論を組み合わせることで自動制御を達成するもので、基礎的なアルゴリズムを開発し、数値実験を通して良好な結果が得られることを確認した。後者については、確率系の状態推定だけでなく、系の背後にある確率分布のモデル化も行えることが数値的に確認できている。また、上記課題と並行して、系の確率的動特性を決めるランダム行列がランダムポリティープで表される不確かさをもつ場合に、その不確かさのもとでさまざまな制御性能を保証する制御器を設計することを可能にする、汎用的な線形行列不等式導出法について検討した。これらの研究成果は、事前に厳密なモデルを得ることが難しい制御対象に対して、制御器が観測データからその特性を自律的に推定しつつ制御を行うことを可能にするための基礎技術に相当するものであり、その発展によって実社会のさまざまな課題の解決につながるものと期待している。

(3) 2019年度は最終年度として、前年度までに遂行が完了していなかった研究項目の遂行と、その成果の学術誌への投稿を行った。一部成果については査読が完了していないものの、当初の研究目的は概ね達成できたと考える。主要な進展としてはまず、本研究におけるキーアイデアの1つである「確率系制御への線形行列不等式手法の活用」に絡み、係数行列がランダム行列で与えられる確率系の安定性を、保守性を生じることなく数値的に解析するための条件式導出に関する成果が国際誌に掲載されたことが挙げられる。これにより、本研究の根本部分の妥当性が担保されると同時に、さまざまな方向性への理論の発展がこれまで以上に容易になった。前年度に取り組んだ出力フィードバック制御器設計に関する研究はこの発展の一部であり、その成果も本年度に国際誌へ掲載された。また、H2性能と並んで重要な指標と考えられているH性能が、確定系を対象とした制御理論においては有界実補題と呼ばれるツールにより解析できることが知られているが、そのような解析が確率系に対しても可能であることが明らかとなり、その具体的な数値解析には上記成果が重要な役割を果たすことも明らかとなった。導出した条件式はいずれも通常の線形行列不等式として取り扱うことが可能であるため、その適切な併用により、多目的制御が実現できると期待される。このような視点は当初の計画にはなかったものであり、計画以上の収穫があったと言える。これらの他、マルコフジャンプ系に関する成果や、確率系の背後にある確率分布の近似に関する成果なども得られた。

以上を通して、適用可能な制御対象のクラスの拡大、安定性以外の性能指標への対応、実用性の向上、という3つの観点から既存理論の高度化を達成した。

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 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Hosoe, T. Hagiwara and D. Peaucelle	4. 巻 63
2. 論文標題 Robust Stability Analysis and State Feedback Synthesis for Discrete-Time Systems Characterized by Random Polytopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 556 ~ 562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2017.2730586	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 該当する

1. 著者名 Hosoe Yohei, Peaucelle Dimitri	4. 巻 3
2. 論文標題 Static Output Feedback Stabilization of Discrete-Time Linear Systems With Stochastic Dynamics Determined by an Independent Identically Distributed Process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 673 ~ 678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2019.2916289	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 該当する

1. 著者名 Hosoe Yohei, Hagiwara Tomomichi	4. 巻 64
2. 論文標題 Equivalent Stability Notions, Lyapunov Inequality, and Its Application in Discrete-Time Linear Systems With Stochastic Dynamics Determined by an i.i.d. Process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 4764 ~ 4771
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2019.2905216	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 Nagira Yuji, Matsuzaki Hiroki, Hosoe Yohei, Hagiwara Tomomichi	4. 巻 32
2. 論文標題 Gain Scheduled State Feedback Synthesis for Markovian Jump Systems with Mode Transition Probabilities Depending on Time-Varying Parameters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 396 ~ 407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.32.396	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 NAGIRA Yuji, HOSOE Yohei, HAGIWARA Tomomichi	4. 巻 55
2. 論文標題 A Bounded Real Lemma for Discrete-time Systems with Stochastic Dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 816 ~ 822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.816	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16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Y. Nagira, Y. Hosoe and T. Hagiwara
2. 発表標題 On stability analysis based on stochastic D-scaling
3. 学会等名 2018 IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagira, Y. Hosoe and T. Hagiwara
2. 発表標題 Stochastic D-scaling technique for application in robust stability analysis of uncertain discrete-time stochastic 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 Y. Nagira, Y. Hosoe and T. Hagiwara
2. 発表標題 The $l_p$ induced norm and the small-gain theorem for discrete-time stochastic systems
3. 学会等名 2018 European Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口郁馬, 柳楽勇士, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率的動的Dスケーリングに基づくロバスト安定解析に関する考察
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 松崎弘樹, 柳楽勇士, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 モード遷移確率が時変パラメータに依存する確率的スイッチドシステムのゲインスケジューリング制御
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥野誠也, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 累積分布関数のL およびL1ノルムに基づく近似を用いた確率系の安定化設計
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Hosoe and T. Hagiwara
2. 発表標題 Robust stability analysis of discrete-time linear systems with dynamics determined by a Markov process
3. 学会等名 20th IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福井章悟, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率的なダイナミクスを有する離散時間線形系のロバスト安定化出力フィードバック制御
3. 学会等名 第61回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山内敏嗣, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 ディスクリプタ形式の離散時間確率系に対するロバスト安定化状態フィードバック制御
3. 学会等名 第61回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 細江陽平, 岡本高志, 萩原朋道
2. 発表標題 確率的動特性をもつ離散時間線形系のH2性能解析および設計
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳楽勇士, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 一般的な入出力系の因果性に関する考察
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本高志, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率的な動特性を有するシステムとしての同定について: DCモータとそのH2制御実験を通した一考察
3. 学会等名 第5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 2018年

1. 発表者名 柳楽勇士, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率的Dスケールリングに基づく安定解析に関する考察
3. 学会等名 第5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 2018年

1. 発表者名 Y. Hosoe and D. Peaucelle
2. 発表標題 Static output feedback stabilization of discrete-time linear systems with stochastic dynamics determined by an i.i.d. process
3. 学会等名 2019 IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大崎健太, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率系制御のためのメタヒューリスティクスを用いた2次元確率分布の近似
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 細江陽平
2. 発表標題 確率的動特性をもつ離散時間系の制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----