

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04546

研究課題名（和文）確率的動特性をもつ系の制御理論深化とその応用

研究課題名（英文）Deepening of control theory for systems with stochastic dynamics and its application

研究代表者

細江 陽平（Hosoe, Yohei）

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：50726411

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、確率的動特性をもつ系（システム）を制御するための理論深化とその応用に取り組んだ。動特性を決める確率過程がi.i.d. (independent and identically distributed) 過程で与えられる場合については、各種制御問題に対して線形行列不等式条件を導出することができた。また、確率過程を制約しない場合について、安定性を必要十分の意味で特徴づけるリアプノフ不等式の導出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果のうち、一般の確率過程で動特性が決まる系に関するものについては、既知の結果を含む様々な安定性の議論を包含するものとなっており、その活用によって確率制御に関する新たな領域の開拓が可能となった。また、確率過程をi.i.d.に限定する状況下で得られた成果をネットワーク化制御系に適用できることが明らかとなり、自動車の遠隔型自動運転等の社会課題解決に貢献できることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this project, we worked on subprojects related to deepening of control theory for systems with stochastic dynamics and its application. In the case where the stochastic process determining the dynamics is given by an i.i.d. (independent and identically distributed) process, we derived linear matrix inequality conditions for various control problems. In addition, in the case where no constraints are imposed on the stochastic process, we succeeded in deriving Lyapunov inequalities that characterize stability in a necessary and sufficient sense.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 確率系 確率システム 確率制御 LMI 確率的動特性 ランダムポリトープ ネットワーク
化制御系

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現実の対象や現象を数理モデルで完全に表現しきることは難しく、未知の部分についてしばしば確率的な解釈がなされる。例えば、ネットワークシステムにおけるパケット到着間隔の分布や分散システムにおける故障発生率、より身近なところでは気象予報の降水確率などが挙げられる。実対象の制御においてこれらの確率的要素が本質的である(とみなすのが妥当である)場合には、それらを考慮した系をモデルとして採用することが望ましい。離散時間線形系に議論を限定するとき、そのような確率的な振る舞いをする系は係数行列がランダム行列で与えられる状態方程式で記述される。このようなランダムな係数を持つ離散時間確率系(すなわち確率的動特性をもつ離散時間系)の制御に関する研究は、係数行列が確定行列で与えられる従来の確定系に関する研究に比べ、十分に進んでいないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、報告者のこれまでの研究で得られた成果をベースとして、数値計算の軸、学問的基礎の軸、実応用の軸、の3つの軸に対応する研究項目に取り組むことを通して、ランダムな係数行列を持つ離散時間確率系の制御に関する理論および技術の確立に寄与すること、である。これら3つの軸に対応する研究項目の内容は次節にて述べる。

3. 研究の方法

当初計画における具体的な方法は以下の通りである。

(1)数値計算の軸に関する研究項目では、計算機を利用して制御系の性能解析や、制御器の設計が可能になるよう、関連する条件式を数値的取扱いの容易な線形行列不等式(LMI)形式で導出することを試みる。より具体的には、確率系の動特性を決める確率過程として i.i.d. (independent and identically distributed) 過程を扱う場合に議論を限定した状況下で、期待値を事前処理する手法を駆使して安定性だけでなく H2 性能なども特徴づける LMI 条件を導出することを目指す。また、その他のクラスの確率系に対しても同様の議論が可能かどうか検討する。

(2)学問的基礎の軸に関する研究項目では、確率系の動特性を決める確率過程に対する仮定として、必要最低限のもののみを用いた状況下で安定性や制御性能の取り扱いについて検討し、それらの特徴付ける(LMI化前の)条件式を、条件付き期待値の性質等を駆使して導出することを目指す。また、そのような条件式導出に成功した場合には、確率過程に追加の仮定を導入することで、同種の確率系に関する既知の結果との整合や関係について調査する。これらを通して、確率系の制御の真髄に迫り、理論の深化を試みる。

(3)実応用の軸に関する研究項目では、上記確率制御理論を実対象に適用するためのモデル化方法について検討する。より具体的には、非線形カルマンフィルタを用いて未知パラメータの(値そのものではなく)確率分布を推定する方法を第一候補とし、数値実験および実機実験を通してその可能性について模索する。なお実機実験では DC サーボモータを検証用の対象として使用する。

4. 研究成果

数値計算の軸、学問的基礎の軸、実応用の軸、の3つの軸に関して得られた成果を述べる。

(1)数値計算の軸に関する研究項目では、まず確率系の背後にある分布の不確かさをランダムボリトープにより表現する場合の安定化制御器設計問題を、数値的な計算が容易な線形行列不等式(LMI)最適化問題に帰着できることを示した論文が国際誌に掲載された。本成果はフランスの共同研究者との共著であり、国際共同研究としての成果である。また、H2性能と呼ばれる、外乱入力への出力への影響度合いを評価する指標に関する制御を確率系に対して実現するための LMI 条件も導出することができ、その成果をまとめた論文も国際誌に掲載された。この他にも、H性能と呼ばれる、H2性能とは別の指標を特徴づける有界実補題などに関しても部分的な成果を得ることができている。これらの成果の大部分は確率過程を i.i.d.過程に限定することを前提にしているが、少なくともそのような限定のもとでは、制御に関する多くの問題が LMI

に基づいて取り組めることを確認できた。このようなアプローチがより一般のクラスの確率過程および確率系に対して適用していけるかどうか、今後も検討を続けることが望まれる。

(2) 学問的基礎の軸に関する研究項目では、まず本プロジェクト最大の成果である論文の国際誌への掲載が特筆に値する。確率系の動特性を決める確率過程に本質的な制約を一切課さずに、安定性を特徴づけるリアプノフ不等式を導出することに成功している既存研究は存在せず、この論文により初めてそれが示された。この論文では離散時間線形系に議論を限定する中で、最も一般的な状況を想定し、その状況下で2次モーメント指数安定性を必要十分の意味で特徴づけるリアプノフ不等式を導いている。議論を離散時間線形系に限定する限りにおいてはこれ以上系のクラスの拡張余地がないこと、また条件式が必要十分の意味で導出されていることからそれ以上結果に改善の余地がないこと、という、結果の普遍性に関する2点が理論保証されている。この論文ではさらに、2次モーメント指数安定性と2次モーメント一様漸近安定性の等価性など、状態のユークリッドノルムの2次モーメントに関する安定性について包括的に議論している。また、確率過程に追加の制約を課せば、これらの成果はその特殊ケースとして、様々な確率系および確定系に関してすでに知られている結果に一致することが確認でき、それらをすべて統一的に取り扱うことが可能な世界初の成果となっている。この成果の活用により、これまでに扱われてこなかった確率系への安定化理論の構築なども容易にできるようになっており、そのような方向性での理論のさらなる体系化も望まれる。また、当初予定していなかった、この成果を非線形系も扱えるよう拡張する研究にも共同研究者の協力のもと着手することができた。このプロジェクトの成果を起点とするさらなる理論開発や体系化が望まれる。

(3) 実応用の軸に関する研究項目では、まず当初の計画通り、非線形カルマンフィルタを用いる方向性について検討し、シミュレーションや、DCモータを用いた実験ベースでその効果を検証した。これにより、DCモータのように対象自体が安定であるようなものの制御については、狙い通りの制御が可能そうであることは確認できた。一方不安定系を対象とする場合には、非線形カルマンフィルタによるパラメータ推定に課題があり、ただちに適用可能と言える水準の結果は得ることができなかった。周辺事情については引き続き検討を要する。これらの他、メタヒューリスティクスを用いた確率分布の近似にも取り組み、設計時の計算負荷低減に効果があることを確認している。また、当初の計画にはなかった話として、提案している理論体系と、通信遅延がランダムであるようなネットワーク化制御システムの安定化との相性がよいことが研究遂行中に明らかとなり、関連する発表を国際会議等で行った。制御対象と制御器をインターネットでつないで遠隔地から制御を行う際、制御対象の出力値と、制御器が決定する入力値を、ごく短い時間間隔（例えば100ミリ秒等）で継続的に送り合う必要がある。このような方式で制御を行うとき、通信遅延は出力値や入力値の送信ごとにばらついてしまうため、そのばらつきに関する何らかの理論保証が必要になる。この理論保証を、提案する確率制御の枠組みで行うことが可能になっている。このような視点での本プロジェクトの成果の活用事例として、民間企業が主体となって移動体（自動車等）の遠隔制御に関する検討がなされ、論文の国内誌への掲載につながった。この論文の内容はまだ制御の方式としては出発点的な基礎レベルであるので、提案する制御理論のさらなる発展と並行して、このような社会実装への取り組みの加速も望まれる。

以上の通り、いずれの軸に関する研究項目についても、一定の成果を得ることができた。本プロジェクトにより理論の深化方向と実応用方向の両方で当初の想定以上の可能性も見えている。各々に対応する後継プロジェクトにて新たに取り組み、国民生活に役立つよう研究をさらに推し進めていきたい。

<引用文献>

Y. Hosoe, D. Peaucelle and T. Hagiwara, Linearization of expectation-based inequality conditions in control for discrete-time linear systems represented with random polytopes, *Automatica*, Vol. 122, Article 109228, pp. 1--8, 2020.

Y. Hosoe, T. Okamoto and T. Hagiwara, H2 performance analysis and synthesis for discrete-time linear systems with dynamics determined by an i.i.d. process, *IEEE Control Systems Letters*, Vol. 7, pp. 751--756, 2023.

Y. Hosoe and T. Hagiwara, On second-moment stability of discrete-time linear systems with general stochastic dynamics, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 67, No. 2, pp. 795--809, 2022.

亀岡翔太, 細江陽平, ランダムな通信遅延が生じる環境下での移動体の遠隔制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 58, No. 9, pp. 420--428, 2022.

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hosoe Yohei, Okamoto Takashi, Hagiwara Tomomichi	4. 巻 7
2. 論文標題 H2 Performance Analysis and Synthesis for Discrete-Time Linear Systems With Dynamics Determined by an i.i.d. Process	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 751 ~ 756
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LCSYS.2022.3224875	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 KAMEOKA Shota, HOSOE Yohei	4. 巻 58
2. 論文標題 Remote Control of Vehicles in an Environment with Random Communication Delay	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 420 ~ 428
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.58.420	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 Hosoe Yohei, Hagiwara Tomomichi	4. 巻 67
2. 論文標題 On Second-Moment Stability of Discrete-Time Linear Systems With General Stochastic Dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 795 ~ 809
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2021.3057994	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 56
2. 論文標題 Verification of the Scaling Effect by Stochastic Scaling Elements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 421 ~ 423
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.56.421	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 Hosoe Yohei, Peaucelle Dimitri, Hagiwara Tomomichi	4. 巻 122
2. 論文標題 Linearization of expectation-based inequality conditions in control for discrete-time linear systems represented with random polytopes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109228 ~ 109228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2020.109228	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

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 道谷優貴, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率系に対するゲインスケジュールド状態フィードバックのLMIに基づく設計
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

1. 発表者名 山岸凌, 細江陽平, 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ステップ目標値に対する制御
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

1. 発表者名 張瑞奇, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率系に対する多目的状態フィードバック制御器設計のためのLMI条件
3. 学会等名 2021年度SICE関西支部・ISCIEシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早瀬健浩, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 通信遅延が指数分布を用いて表されるネットワーク系に対する予測型オブザーバ設計
3. 学会等名 2021年度SICE関西支部・ISCIEシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森山翔太, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 DCモータの制御実験による粒子フィルタを用いた確率制御手法の有効性検証
3. 学会等名 2021年度SICE関西支部・ISCIEシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Osaki, Y. Hosoe and T. Hagiwara
2. 発表標題 Metaheuristics-based approximation of two-dimensional probability distributions for stochastic systems control
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後田尚紀, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率的動特性をもつ離散時間系に対する有界実補題とその妥当性検証
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 滝田大暉, 細江陽平, 萩原朋道
2. 発表標題 確率系に対する制御器設計のためのコルモゴロフ距離に基づく多次元確率分布の近似
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 細江陽平
2. 発表標題 通信遅延が指数分布を用いて表されるネットワーク系の非周期的制御
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀岡翔太, 細江陽平
2. 発表標題 通信遅延が生じる環境下での移動体の遠隔制御
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 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8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム(招待講演)
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			
フランス	LAAS-CNRS			