

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02171

研究課題名（和文）高度複雑信号で駆動する次世代システム制御理論の構築

研究課題名（英文）Construction of a Next-Generation Control Theory Driven by Highly-Complex Signals

研究代表者

西村 悠樹 (Nishimura, Yuki)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：20549018

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：理論面では、不連続特性を持つシステムのラフシステム化の検討、確率安定論的側面からの解析の高度化、特に確率有限時間安定性や確率有界性や確率制御バリア関数についての理論研究を進めた。

応用面では、二輪車両口ポットの確率安全制御設計と実験、電動車椅子のヒューマンアシスト制御設計と実験、超音波モータのラフ制御化のための確率有限時間整定制御を推し進めて制御バリア関数と最短時間制御の組合せたサーボ制御機構を作ったほか、また、船舶の確率安全制御、非線形確率制御理論に基づく宇宙機の姿勢制御なども行った。

これらの成果は積極的に全文査読付き国際会議等で発表するとともに、一部は学術論文誌へ投稿した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

政府の「未来投資戦略2018」で求められている次世代モビリティや航空宇宙産業の理論的支柱であるシステム制御理論において、システムが持つ非線形性・不規則性・不連続性・高周波振動性等の複雑な性質を解析し制御設計に役立てる必要がある。本研究課題で得られた非線形制御理論ならびに非線形確率制御理論の各種知見、およびそれらに基づく二輪車両口ポット・電動車椅子・超音波モータのサーボにおける実機実験結果や、自動操船や宇宙機への数値実験は、これら複雑な性質を高度複雑信号（ラフ信号）と捉え、その統一表現である非線形ラフシステムに基づく制御理論を提唱するために必要な基礎的結果であった。

研究成果の概要（英文）：On the theoretical side, we have studied the rough systemization of dynamical systems with discontinuous terms and advanced the analysis from the stochastic stability theory aspect, especially on stochastic finite-time stability, stochastic boundedness, and stochastic control barrier functions.

On the application side, we have conducted stochastic safety control design and experiments for a two-wheeled vehicle robot, human assist control design and experiments for an electric wheelchair, and a servo control combining a control barrier function and minimum-time control by promoting stochastic finite-time settling control for rough control of an ultrasonic motor. We have also worked on stochastic safety control of ships and attitude control of spacecraft based on nonlinear stochastic control theory.

These results have been actively presented at international conferences, and some of them were submitted to academic journals.

研究分野：非線形システム制御理論

キーワード：非線形制御 確率制御 ラフパス解析 リャプノフ安定性 制御バリア関数

## 1. 研究開始当初の背景

政府の「未来投資戦略 2018」では、Society 5.0 の具体化のため、データ駆動型サイバーフィジカルシステムの構築が求められている。つまり、ビッグデータや AI 技術を高度な数理モデルと融合し、統計処理や学習結果に確実性や安全性等を付加するための次世代システム制御理論の創設が急務であるとされていた。

上記課題に対し、次世代システム制御理論では、実在システムが持つ非線形性・不規則性・不連続性・高振動性・特性変動等を的確に捉えてシステムモデルに落とし込む。研究開始当初までに、ハイブリッドシステムやネットワーク化システム等の文脈で精力的に研究されていたが、その統一的体系化は途上にあった。また、人命に直接関わるような「失敗できない」システムを安全に制御するには、複雑な性質への高いロバスト性と安全性が求められていた。

## 2. 研究の目的

上記 1 で述べた喫緊の課題に対応可能な理論の一つに、確率微分方程式に基づく非線形確率システム制御理論がある。最近ではより実在の外乱に近い非マルコフモデル等への拡張がトレンドであったが、理論の難解さや実用化の希薄さから高い参入障壁があった。つまり、従来技術から繋がりが見える新しい制御理論が必要である。そのため、本研究課題では、非線形性・不規則性・不連続性・高周波振動性・特性変動などを抽象概念で統一化し、次世代システムのダイナミクスを常微分方程式の延長として表現し、それに基づく次世代制御理論を従来からの発展形として記述し、各種性質についての要不要の設計をサイバー空間上で達成することを目標とした。

より具体的には、研究代表者がこれまでに進めてきたラフシステム制御理論の体系化が極めて有効であると考えられた。これは、ラフパス解析に基づく新しいシステム理論であり、入力信号の非有界変動性がダイナミクスにもたらす影響を「隠れたダイナミクス(ラフパスの高次項)」として明確化する。これにより、常微分方程式からのスムーズな接続のもとで確率微分方程式を記述できる上、非ガウス性や非マルコフ性といった従来では扱い難かった複雑な性質を持つ信号を一手に扱えるようになった。本研究課題では、この研究方向を推し進めることで、前述した各種の複雑な性質をもラフシステムの拡張概念でひとまとめに扱えることを示し、それによって高度に複雑な次世代システムの制御設計に見通しを立てるという目的であった。

## 3. 研究の方法

次世代システム制御理論の創設のため、実在システムの複雑な性質を高度複雑信号(ラフ信号)の枠組みで捉え直して非線形ラフシステム制御理論を構築することが主たる目的であった。また、提案理論が未来投資戦略 2018 の基礎固めに役立つことを示すため、電気系・ロボット・ドローン・宇宙機等の高度なモデル化・推定・サーボ制御・安全制御・高ロバスト制御等へと展開することを計画していた。主に以下の実施を気隠していた。

- 1) 不連続性や微分不可能性をラフシステムに取り込むこと
- 2) ラフシステムの一種である確率システムについての最適制御の深化
- 3) ラフシステムの一種である確率システムについての安定性解析・制御の深化
- 4) ラフシステムの一種である確率システムについての安全制御理論の開拓
- 5) ラフシステム制御理論の応用展開

## 4. 研究成果

前項に示した目的と計画に基づき、研究を遂行した結果として主に以下の成果を得た。

- 1) 不連続性や微分不可能性をラフシステムに取り込むこと
  - (ア) 非平滑リャプノフ関数による確率安定性解析の深化 (2020)
  - (イ) ラフシステム制御理論の整理 (2021)
  - (ウ) 二輪車両モデルのノイズを含む線形最適レギュレータ (2023)
- 2) ラフシステムの一種である確率システムについての最適制御の深化
  - (ア) 入力制約下における確率微分動的計画法によるクアッドコプタの最適位置・高度制御 (2020-2023)
  - (イ) 経路積分に基づく入力制約付き非線形確率最適制御 (2020-2023)
- 3) ラフシステムの一種である確率システムについての安定性解析・制御の深化
  - (ア) 連続確率システムの概有界性と実用漸近安定性の条件 (2020-2021)

- (イ) 確率線形 2 次モデルにおける概軌道回復制御 (2020-2022)
- (ウ) 加法ノイズを伴うスライディングモード制御の解析 (2020-2023)
- 4) ラフシステムの一つである確率システムについての安全制御理論の開拓
  - (ア) 確率システムの概安全性解析 (2022-2023)
  - (イ) 確率制御バリア関数による制御設計について (2022-2023)
  - (ウ) 安全確率を陽に保証する確率安全制御 (2022-2023)
- 5) ラフシステム制御理論の応用展開
  - (ア) 収束速度設計に基づく超音波モータの高精度位置決め制御 (2020)
  - (イ) 外乱下における制御バリア関数ベースドヒューマンアシスト制御 (2020)
  - (ウ) 非線形安定化制御のドローンへの展開 (2021)
  - (エ) 確率外乱下における UAV の有限時間整定制御の検討 (2022)
  - (オ) 確率バックステッピング法によるセンサノイズの影響を考慮した宇宙機の姿勢追従制御系設計 (2022)
  - (カ) 確率微分動的計画法を用いた空気抗力を考慮したドローンの最適制御 (2022)
  - (キ) 確率的振動を伴う二輪車両ロボットの衝突防止制御 (2023)

上記の結果は、システム制御理論・確率システム論・安定論の更なる発展のために重要であるとの位置づけがなされており、それは上記の結果の複数が、当該分野における国際的あるいは全国的な一流紙に掲載されたことで客観的に示されている。

以上より、基盤研究の枠組みとしては十分に目標達成したものと考えられる。

今後の展望としては、ラフシステムの表現として確率システムだけでなく確定システムや非マルコフ過程を含むより一般的なクラスを包含した結果を導くこと、やや進行の停滞した不連続システムのラフシステムの解析の整理など、ラフシステム制御理論としてまとめるメリットをより強調することが求められると考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kenta Hoshino	4. 巻 1
2. 論文標題 On Estimate of Settling-Time Distributions of Finite-Time Stable Stochastic Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The proceedings of 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control	6. 最初と最後の頁 1672-1677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC51059.2022.9992934	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 Y. Nakatsuka, S. Satoh, and K. Yamada	4. 巻 1
2. 論文標題 Landing guidance control combining powered descending with nonlinear optimization and vertical descending with model prediction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 33rd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS2022)	6. 最初と最後の頁 2022-d-71s
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 Satoh Satoshi, Saijo Hironori, Yamada Katsuhiko	4. 巻 33
2. 論文標題 Optimal Position and Attitude Control of Quadcopter Using Stochastic Differential Dynamic Programming with Input Saturation Constraints	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 283 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p0283	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 D'Ortona A., Capello E., Satoh S.	4. 巻 54
2. 論文標題 Design of Sliding Mode Techniques for a CMG-based Testbed Attitude Control System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 506 ~ 511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.10.405	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 HAYASHI Yuka, NAKAMURA Hisakazu	4. 巻 57
2. 論文標題 Control Barrier Function Based Human Assist Control under Disturbance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 339 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.57.339	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 星野 健太	4. 巻 61
2. 論文標題 非線形安定化制御のドローンへの展開	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 121 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.61.121	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 Nishimura Yuki	4. 巻 54
2. 論文標題 On Stability Analysis of Sliding-Mode Controlled Systems With Additive Noises	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 647 ~ 652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.06.175	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 西村 悠樹	4. 巻 64
2. 論文標題 非平滑リャプノフ関数による確率安定性解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 264 ~ 269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.64.7_264	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 Sato Satoshi, Saijo Hironori, Yamada Katsuhiko	4. 巻 33
2. 論文標題 Optimal Position and Attitude Control of Quadcopter Using Stochastic Differential Dynamic Programming with Input Saturation Constraints	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 283 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p0283	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 Sato Satoshi, Kappen Hilbert J.	4. 巻 15
2. 論文標題 Nonlinear Stochastic Optimal Control with Input Saturation Constraints Based on Path Integrals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1169 ~ 1175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23177	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17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yuki Nishimura
2. 発表標題 On almost sure control barrier functions for stochastic systems
3. 学会等名 The 54th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鬼塚柊羽, 西村悠樹
2. 発表標題 船の軌道追従におけるソントラゲ型非線形確率制御
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村悠樹, 星野健太
2. 発表標題 確率制御バリア関数による制御設計について
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土田湧貴, 西村悠樹
2. 発表標題 超音波モータの位置決め制御における制御バリア関数を用いた準最短時間制御
3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村悠樹, 星野健太
2. 発表標題 安全確率を陽に保証する確率安全制御
3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大迫史也, 西村悠樹
2. 発表標題 確率外乱下における二輪車両ロボットの衝突防止制御
3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 星野健太
2. 発表標題 確率外乱下におけるUAVの有限時間整定制御の検討
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮澤実央, 佐藤訓志
2. 発表標題 確率バックステッピング法によるセンサノイズの影響を考慮した宇宙機の姿勢追従 制御系設計
3. 学会等名 第32回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤訓志, 孫芸萍
2. 発表標題 確率微分動的計画法を用いた空気抗力を考慮したドローンの最適制御
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Nishimura
2. 発表標題 On stability analysis of stochastic systems with quasi-singular control laws
3. 学会等名 The 53rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yuki Nishimura
2. 発表標題 Stability analysis for a singular optimal controlled system with an additive noise
3. 学会等名 SICE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Hoshino and Yuki Nishimura
2. 発表標題 Conditions of almost sure boundedness and practical asymptotic stability of continuous-time stochastic systems
3. 学会等名 IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Satoh and Katsuhiko Yamada
2. 発表標題 An improvement of attitude estimation based on stochastic kinematics modeling on $S^3$
3. 学会等名 The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Application (SSS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村悠樹
2. 発表標題 ラフシステム制御理論～確率システムを内包するより一般的な制御システム表現
3. 学会等名 第8回制御部門マルチシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西山知希、西村悠樹
2. 発表標題 収束速度設計に基づく超音波モータの高精度位置決め制御
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 山本和弘、西村悠樹
2. 発表標題 確率線形2次モデルにおける軌道概回復制御
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 山本和弘、西村悠樹
2. 発表標題 確率制御システムにおける軌道概回復制御
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>鹿児島大学工学部先進工学科機械工学プログラム西村研究室  <a href="https://nishimurayk.wixsite.com/nishimurab">https://nishimurayk.wixsite.com/nishimurab</a></p>
---

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
研究分担者	佐藤 訓志  (Sato Satoshi)  (60533643)	大阪大学・大学院工学研究科・教授    (14401)	
研究分担者	中村 文一  (Nakamura Hisakazu)  (70362837)	東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・教授    (32660)	
研究分担者	星野 健太  (Hoshino Kenta)  (10737498)	京都大学・情報学研究科・助教    (14301)	

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