

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32687

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03433

研究課題名(和文) 時間遅れフィードバック法を用いた確率システムにおける拡散現象の制御

研究課題名(英文) Controlling diffusion processes in stochastic systems through the time-delayed feedback method

研究代表者

小林 幹 (Kobayashi, Miki)

立正大学・経済学部・准教授

研究者番号：10547011

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)：本研究は、時間遅れフィードバック法を用いて確率過程の拡散現象を制御する手法を確立し、その手法の数学的正当性を示し、そして様々な確率システムへこの手法を適用することが主な目的である。本研究の主な結果は以下に示す4つである。(1)白色ガウスノイズの加わる線形システムにおける制御の妥当性の数学的証明(2)一般的なノイズ、主としてカオスノイズ、への拡張(3)非線形システムで見られるノイズ同期現象への適用(4)ランダム力学系のカオス制御への適用。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、確率過程の拡散制御を力学系のアイデアに基づいて構築し、拡散現象をきめ細やかに制御する(拡散現象の拡散係数を任意の値にする)ことに成功した初めての研究である。これはノイズ制御の意味で大変意義のあるものであると考えている。応用上、ノイズの影響を小さくすることでシステムのパフォーマンスを上げたり、逆にノイズを積極的に使用してシステムのパフォーマンスの向上を図る場合において、ノイズ制御は必須の技術であり、この技術の基礎となる理論を構築したという意味で学術的社会的意義は大きいと思われる。

研究成果の概要(英文)：The main objective of this research is to establish a method for controlling diffusion phenomena in stochastic processes using the delayed feedback control technique, demonstrate the mathematical validity of this method, and apply it to various random dynamical systems. The research yields four main results, as follows:(1)Mathematical proof of the validity of control in linear systems with white Gaussian noise.(2)Extension of the method to general noise, primarily chaos noise.(3)Application of the method to noise synchronization phenomena observed in nonlinear systems.(4)Application of the method to chaos control in random dynamical systems.

研究分野：力学系

キーワード：確率制御

1. 研究開始当初の背景

ノイズ(本研究では、確率的で不規則な振動と定義する)は、これまで、邪魔なものとして認識されており、ノイズの影響をいかに小さくするかに着目して研究がなされてきた。しかしながら、近年ノイズの重要性が見直され、ノイズを使用することでデバイスの機能を高めたり、ノイズの効果をうまく使った医療器具の開発など、ノイズを積極的に利用する動きが盛んになっている。ノイズの利用に関するほとんどの理論研究はノイズ強度が自在に変えられることを前提とし構築されているが、実際ノイズの強度を自在に変えるための方法についての理論研究はほとんど行われていない。応用研究では温度を用いてノイズの強度を制御する方法が主流である。確かに、温度を調節することである程度ノイズ強度を制御することはできるが、温度を変えることでシステムに思わぬ影響を与えてしまうことや、そもそも温度調整ではノイズ強度のきめ細やかな調整は不可能であり、温度を用いたノイズの制御にはいくつかの不完全な点がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ノイズ強度を制御するための制御手法を理論的に構築することである。そのために本研究で行うことは、確率システムにおけるノイズ強度を自由自在に制御するための制御理論を構築し、その妥当性を数学的に証明し、そして構築した理論を実験へ適用可能な形に整備することである。特に、ノイズの影響として様々な現象に現れる拡散現象を自在に操るための制御理論を構築する。拡散現象は、ブラウン運動、生物、工学、流体力学や材料科学など非常に広いクラスで観察される普遍的な現象である。拡散現象を定量化した量として良く使われるのは、拡散係数と呼ばれるシステムの揺らぎの分散に相当する量である。本研究はノイズの制御として、拡散係数を任意の値へと制御するための理論を構築する。

そのために使用する制御手法は、遅れ時間フィードバック法である。本手法は、元々はカオス制御の文脈で使用されていたが、我々のグループの研究でノイズの制御にも使用することが可能であることが見出された。本研究では、遅れ時間フィードバック法を用いたノイズ制御について、数学解析や数値解析を用いて詳細に研究する。

3. 研究の方法

(1) 白色ガウスノイズの加わる線形システムにおける制御の妥当性の数学的証明。

まずは最も単純な場合の制御についてその数学的妥当性を研究する。具体的には、白色ガウスノイズの加わる線形システムに対して、遅れ時間フィードバック法を適用した場合の拡散現象についてその拡散係数のノイズ強度依存性を数学的に明らかにする。

数学的証明では、二つの方向から考える。一つ目は制御理論でよく用いられるラプラス変換を用いてシステムを波数空間へと変換させて統計量である拡散係数を扱うことで確率の影響をなくして解く方法であり、これは、力学系の観点である。二つ目は、確率微分方程式論で発展している手法や数学定理を利用し、確率過程のダイナミクスそのものを扱って拡散現象を扱う方法である。

(2) 一般的なノイズへの拡張。

上記(1)で証明したノイズは白色ガウスノイズに限定されている。しかしながら、より現実的にはより多くのノイズについて本手法の妥当性を考察することが重要である。そのため、より一般的なノイズとして、カオス的ノイズ(カオスシステムから得られる不規則な時系列)を用いて、カオス的ノイズが加わった線形システムに対して、本制御手法が適用可能かどうかを調べる。カオス的ノイズは、決定論システムから構築されるものであるが、様々な統計性を持った不規則時系列であり、白色ガウスノイズを含む多くのノイズと同等の性質を持たせることができる。

(3) 非線形システムへの拡張。

上記(1),(2)で線形システムについて考えるが、非線形システムにノイズが加わることで様々な興味深い現象が報告されており、本手法が非線形システムに適用可能かどうかについて調べることは大変重要である。本研究では、非線形ランダム力学系の同期現象で知られる、ノイズ同期に着目する。

以上が研究計画当初の研究方法であったが、新たな理論的側面として、ランダム力学系のカオス制御についての研究も並行して進めた。

(4) ランダム力学系のカオス制御

近年ランダム力学系におけるカオスについて多くの研究者が精力的に研究を行なっている。決定論的カオスの制御については過去多くの研究がなされているが、ランダム力学系のカオス制御についての研究はほとんど行われていない。遅れ時間フィードバック法がランダム力学系のカオス制御に有効であるかについて詳細に検討する。

4. 研究成果

(1) 白色ガウスノイズの加わる線形システムにおける制御の妥当性の数学的証明。

制御スキームの構築に関しては既に2017年に我々の研究グループが構築しているのでそれを本研究課題では用いる。我々の制御スキームは遅れ時間フィードバック制御系であり、その後の研究でその制御スキームを様々な系に適用しその有用性は確認済みである。そして、その制御スキームの数学的構造の理解に関しては、確率過程の拡散現象を力学系の立場で解析する方法と、確率論の立場から解析する方法の二つの観点から解析することに成功した。力学系の立場での解析は、確率過程の平均量を考え確率的要素を排除することで論理を展開した。確率論の立場での解析では、なぜ制御が成功するかをより直感的に解釈することが可能となった。以上をもって概ね我々の制御理論の数学的構造を明らかにするという課題は達成できたと考えている。

現在論文投稿中である。

(2) 一般的なノイズへの拡張。

一般的なノイズとして、本研究では、カオス的ノイズを用いた。具体的には以下の2つの状況を考えて。(i) カオス的ノイズが直接線形システムに印加される場合の拡散現象。(ii) 非線形カオスシステムにおけるカオス拡散現象。(i)に関しては、印加されるノイズが白色ガウスノイズではなくより一般的なノイズに拡張されたことに対応する。数値計算を主として行なった研究の結果として、白色ガウスノイズの場合と同様に遅れ時間フィードバック法により拡散を制御することに成功した。(ii)については、真に非線形の現象であり、カオスの不規則性に起因した拡散現象である。上記(i)の線形の場合とは本質的に異なる拡散現象であり、この場合でも本制御手法が成功したことは大変驚きの結果であると考えられる。この結果は、数学のランダム力学系の結果としても重要であると考えられ、今後ますますの発展が期待される。

これらの結果はいくつかの国内学会で報告済みである。

(3) 非線形システムへの拡張。

非線形ランダム力学系は様々な興味深い現象が見られる。その中でも、ノイズ同期は応用上も重要であり大変多くの研究が活発に行われている。ノイズ同期とは、非線形振動子のノイズ環境下における同期現象であり、同期非同期転移がノイズ強度により決定されるという興味深い理論研究が報告されている。応用としては同期非同期転移点を制御することは重要であるが、転移点がノイズ強度に依存するので、ノイズ強度の制御の実現なしでは同期非同期転移の制御の成功はあり得ない。そこで我々の制御手法をノイズ同期に適用し、同期非同期転移点を制御することを試みた。大域結合蔵本モデルにノイズを加えた数値実験において、本制御手法がうまく機能し、同期非同期転移点をうまく制御することに成功した。今後、この結果の理論的側面を明らかにし、より複雑なシステムへの適用を目指す。

大域結合蔵本モデルの数値計算の結果はすでにいくつかの国内学会で報告済みである。

(4) ランダム力学系のカオス制御

本手法をランダム力学系の

ノイズと非線形性が相互に関係し合うことで非常に多様なダイナミクス(ノイズ誘起現象)を引き起こすことが知られており、近年数学の力学系の分野で発展が目覚ましい。本研究では、確率レスラー方程式や確率ロジスティック写像に対して、カオス制御が成功する場合と失敗する

場合が存在することを確認、それぞれについてノイズ誘起現象との関連性について詳細な解析を行った。興味深いことの一つとして、制御が失敗する際に起こる現象は確率システム特有のものであり、非線形力学系の制御ではみられない現象であることを見出した。

すでにいくつかの国内学会と国際学会で報告済みであり、本研究成果について論文執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 M. U. Kobayashi, K. Nakai, Y. Saiki, N. Tsutsumi	4. 巻 104
2. 論文標題 Dynamical system analysis of a data-driven model constructed by reservoir computing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 44215
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.104.044215	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 H. Ando, H. Chang	4. 巻 12
2. 論文標題 A model of computing with road traffic dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 175-180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.12.175	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 K. Koyama, H. Ando, K. Fujiwara	4. 巻 12
2. 論文標題 Multiple transition of synchronization by interaction of external and internal forces in bursting oscillator networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 545-553
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.12.545	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 竹原浩太	4. 巻 66
2. 論文標題 マイナス金利モデルについて 金利デリバティブの視点から	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ	6. 最初と最後の頁 381-388
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 H. Chang, H. Ando	4. 巻 1
2. 論文標題 Privacy Preserving Data Sharing by Integrating Perturbed Distance Matrices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SN Computer Science	6. 最初と最後の頁 121-1 - 10
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Koyama, H. Ando, K. Fujiwara	4. 巻 1
2. 論文標題 Effect of External and Internal Forces on Synchronization of Bursting Oscillator Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2020)	6. 最初と最後の頁 131-134
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 張 瀚天・中岡慎治・安東弘泰	4. 巻 119
2. 論文標題 エコステートネットワークの予測能力に関する活性化関数の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 技術研究報告	6. 最初と最後の頁 27-30
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 無
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 安東弘泰 小林幹 竹原浩太	4. 巻 61
2. 論文標題 時間遅れフィードバック制御の確率システムへの応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 自動制御連合講演会	6. 最初と最後の頁 7C2-1,2
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 無
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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 小林幹
2. 発表標題 時間遅れフィードバック法を用いた決定論的拡散の制御
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林幹
2. 発表標題 時間遅れフィードバック法を用いたポテンシャル中のブラウン運動の制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安東弘泰
2. 発表標題 システムに対するリザーブ計算の予測性能評価
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 Kohta Takehara
2. 発表標題 Approximations to SABR-type models
3. 学会等名 Quantitative Methods in Finance 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohta Takehara
2. 発表標題 Monte Carlo Acceleration with Asymptotic Expansion around Non-Gaussian Distributions
3. 学会等名 The second SMU-TMU Joint Workshop on Mathematical Finance and Financial Engineering
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林幹
2. 発表標題 Control of random walkers with time delayed feedback
3. 学会等名 14th IFAC Workshop on time delay systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林幹
2. 発表標題 Time-delayed feedback control of diffusion in random walkers - Analysis -
3. 学会等名 675. WE-Heraeus-Seminar on "Delayed Complex Systems" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林幹
2. 発表標題 Control of deterministic diffusion in chaotic systems with time-delayed feedback control
3. 学会等名 NOLTA 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安東弘泰
2. 発表標題 Time-delayed feedback control of diffusion in random walkers -Phenomena-
3. 学会等名 675. WE-Heraeus-Seminar on “ Delayed Complex Systems ” (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安東弘泰
2. 発表標題 時間遅れフィードバック制御の確率システムへの応用
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 竹原浩太
2. 発表標題 Approximations to SABR-type models
3. 学会等名 The First SMU-TMU Joint-Workshop on Mathematical Finance and Financial Engineering (国際学会)
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
研究 分担 者	安東 弘泰	筑波大学・システム情報系・准教授	
	(Ando Hiroyasu)		
	(20553770)	(12102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	竹原 浩太 (Takehara Kohta) (70611747)	東京都立大学・経営学研究科・准教授 (22604)	

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