

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：17701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K14287

研究課題名（和文）ラフパス解析に基づく非有界変動制御理論の開拓

研究課題名（英文）Development of Control Theory for Unbounded-Variation Systems Based on Rough Path Analysis

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） 2,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本課題は、不規則雑音のような非有界変動過程が含まれる非有界変動システムの安定化問題についての基礎理論を構築するための足固めを行うものであった。成果として、ラフパス解析によって非有界変動システムのダイナミクスを記述し、非線形システムの可制御性判定条件に関する新しい解析結果を得るとともに、隠れたダイナミクスを陽に表す「修正項」を用いた制御戦略を開拓した。また、提案システムの安定論を築く第一段階として、従来の確率安定論からの拡張を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本研究課題で提案したラフ制御システムは、これまでの常微分方程式による確定システムと確率微分方程式による確率システムとを包含し、かつ上位互換となるシステム表現である。そのため、これまで断絶していた確定・確率システムにおける種々の制御理論を、拡大を伴って統一するための礎となると考えられる。

社会的意義：ラフ制御システム制御を用いることで、宇宙ロボットのような非ホロノミックシステムの制御問題を容易にし、また、非線形性や不連続性の解析や設計にも貢献する可能性があることから、Society5.0のためにますます複雑化するさまざまな実システムの制御問題を解決するための設計理論を導くと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to build a basic theory of stabilization for dynamical systems driven by unbounded-variation signals, named "rough controlled systems", which are augmented systems of stochastic differential equation systems. In this study, we obtained system representations of the dynamics of rough controlled systems via rough path analysis, derived a new sufficient condition for controllability of nonlinear controlled systems influenced by unbounded-variation signals, and developing a control strategy by using correction terms, which represents the effects of unbounded-variation signals. Then, we also try extending stochastic stability analysis to rough controlled systems.

研究分野：非線形制御理論

キーワード：非線形制御 ラフパス解析 確率システム 安定論 非ホロノミックシステム

## 1. 研究開始当初の背景

不規則雑音のような非有界変動過程が含まれるシステム(非有界変動システム)の制御問題は省エネルギー戦略や最小コスト運営にとって悩ましいが、これは非有界変動システムが隠れたダイナミクス(修正項)を持つためである。しかも、修正項は確定システムでも簡単に現れるが[1]、ほとんど認知されていない。

非有界変動システムの難しさは常微分方程式の成立要件を満たさないことにある。しかし、近年提案されたラフパス解析[2]を用いれば、数学上正しく微分方程式を導出することができる(ラフ微分方程式)。

本研究課題の目的は、ラフ微分方程式を用いて非有界変動システムの安定性を定義し、修正項の自在な生成(修正項制御)により新しい制御理論を開拓することであった。

## 2. 研究の目的

本課題は、ラフパス解析を用いた非有界変動システムの制御理論を確立するものである。具体的には、以下に示す項目を実施する計画であった。

- (1) 非有界変動システムであるラフ微分方程式についての Lyapunov 安定論を構築する。
- (2) 修正項制御が有効に働く条件を非ホロノミックシステムで検討する。
- (3) 非有界変動性に関わる修正項の同定をリアルタイムで行うためのオブザーバを開発する。
- (4) 修正項制御を利用して非線形システムの可制御性の十分条件を緩和する。
- (5) 修正項制御が可制御な入力アフィンシステムを線形システムに変換することを示す。
- (6) 導出した 1-5 の妥当性と有用性を実機実験により示す。

## 3. 研究の方法

前項で提示した 6 項目についての研究方法は以下の計画であった。

- (1) ラフ微分方程式についての Lyapunov 安定論の構築  
本課題の基礎をなすラフシステムの数学的表現であるラフ微分方程式についての安定論は未だ提案されていない。そこで「確定システムとしてのラフ微分方程式」の Lyapunov 安定論を、ラフパス解析ベースで構築する。
- (2) 修正項制御による非ホロノミックシステムの安定化  
非ホロノミックシステムは滑らかなフィードバックだけでは制御できない。そこで、研究代表者が開発したノイズによる安定化手法を発展させ、簡便でロバストな汎用的制御手法を確立する。
- (3) ラフパス解析を用いた非有界変動項に関するオブザーバの開発  
ノイズによってシステムが励振される場合、一般的にはノイズの真の性質は分からない。そのため、当該システムをラフ微分方程式として修正項をリアルタイムで推定するためのオブザーバを設計する。
- (4) 修正項制御を利用した非線形システムの可制御性判別法の開発  
ラフパス解析で明らかにされる「隠れたダイナミクス」である修正項は、可制御 Lie 代数と密接な関わりがある。このことは、最も自由度の高い修正項が非線形システムの可制御性の必要条件となることが予想される。従って、まずは従来の可制御性における最も緩い十分条件を更に緩和し、可制御 Lie 代数にドリフト項が複雑に関与する場合の十分条件を導出する。
- (5) 修正項制御を利用した入力アフィンシステムの線形化制御入力の開発  
修正項制御を適切に設計すれば、隠れたダイナミクスの自由度によりラフ微分方程式上では制御入力の次元が増える。これを利用して、非有界変動関数を含む制御入力により可制御な入力アフィンシステムが厳密線形化可能となることを示す。
- (6) 実機実験  
計画 1-5 の妥当性と有用性を示すために、超音波モータを用いて制御実験を行う。具体的には、修正項制御により制御の妨げとなる非線形要素を除去した上で、ラフ微分方程式に基づくオブザーバベースド制御を取り入れることで、超精密でロバストな制御機構を開発する。

## 4. 研究成果

前項までに示した目的と計画に基づき、研究を遂行した。その結果として以下の成果を得た。

- (1) ラフ微分方程式に基づくシステム解析と確定ウィーナー過程の提案  
研究開始当初、ラフパス解析に関する文献は、高度に抽象化された数学の文献しか存在しなかった。つまり、ラフシステムの安定論を築く前段階として、まずラフパス解析を用いたシステム表現を具体的に得る必要があった。そこで、ラフパス解析の文献をシステム制御理論研究者にも伝わるように噛み砕き、どのような手順でラフ微分方程式が導かれるかを明らかにし、修正項の生成手順も具体化した。その結果として、そもそもの発端である確率微分方程式における修正項の生成メカニズムを、確定システム(確率要素を含まないシステム)にも適用させられるように

なった。これにより、ウィーナー過程と同様の修正項を導く確定的な信号である確定ウィーナー過程の提案に至った。

### (2) Lie 括弧運動と確定ウィーナー過程に基づく非線形システムの可制御性解析と制御

Lie 括弧運動による制御が、常微分方程式システムだけではなくラフシステムでも同様に実現可能であることを理論的に確かめた。また、前項で得た確定ウィーナー過程を用いることで、Lie 括弧運動が生成されないシステムにおいてもラフシステムの意味では可制御となる十分条件に付いて調査し、そのようなシステムの存在を示すとともに、線形近似でも厳密線形化でもない第三の線形化手法をも提案した。また、これらの成果の中で、これまで「可制御であることは判明しているが理論的な制御設計手法が得られていないシステム」の典型例である水平面劣駆動 2 リンクアーム(図1)をラフシステムの意味で安定化する制御設計手法を開発した。ただし、通常の意味で不可制御なシステムが、ラフシステムの意味で可制御となるケースにおいて、それが現実的にどのような意味を持つかについてはこれからの検討課題である。しかし、この結果は、不可制御なシステムを可制御にしてしまうという問題が実は従来の確率システム制御理論にも含まれていたことを明確化しており、システム制御理論の発展に必要な萌芽的研究としては十分な成果であると考えられる。

### (3) ラフシステム制御実験とオブザーバの検討

超音波モータのサーボ制御におけるラフシステム制御理論の適用を試みた。また、その際にはラフシステム制御理論に基づくオブザーバの設計も行った。ただし、これらを理論的に正当化するためには、スライディングモード制御をはじめとする不連続入力下での従来の解析結果との整合性を図る必要があることと、実機実験に時間を要したという事情があるため、理論的にも応用的にも詳細は未発表である。また、これらの問題は既に萌芽研究の域を超えた大きな問題設定となったため、令和2年度より実施予定の新しい基盤研究課題へと引き継ぐこととなった。

以上より、前項で述べた6項目に関し、「挑戦的萌芽研究」の枠組みとしては十分に目標達成となったものと考えられる。

### 参考文献

- [1] W.S.Liu and H.J.Sussmann: Continuous dependence with respect to the input of trajectories of control-affine systems, *SIAM Journal on Control and Optimization*, Vol. 37, No. 3, pp. 777-803, 1999.
- [2] T. J. Lyons: The interpretation and solution of ordinary differential equations driven by rough signals, *Proc. Symposia in Pure Mathematics*, Vol. 57, American Mathematical Society, 1995.

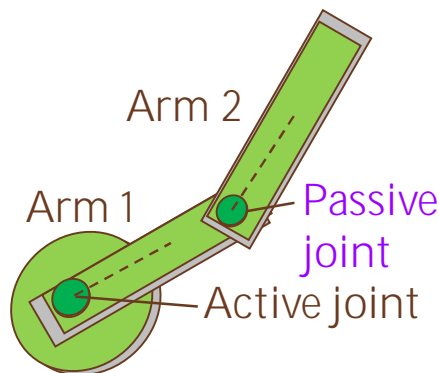


図1 水平面劣駆動 2 リンクアーム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yuki Nishimura	4. 巻 51
2. 論文標題 Rough Linearization By One-Dimensional Rough Paths	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 320 ~ 325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2018.07.298	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kouki Takeuchi and Yuki Nishimura
2. 発表標題 Stabilization of fourth-order chained system by rough signals
3. 学会等名 Proc. 2018 International Symposium on Nonlinear Theory & Its Applications (NOLTA 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村悠樹
2. 発表標題 ラフバス解析に基づく非有界変動制御理論
3. 学会等名 第6回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Nishimura and Daisuke Tsubakino
2. 発表標題 Stabilization of nonlinear systems by adding state-dependent rough signals
3. 学会等名 The 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Taiga Uto and Yuki Nishimura
2. 発表標題 Global solution to nonholonomic system with stochastic feedbacks based on non-smooth stochastic Lyapunov function
3. 学会等名 The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内康貴, 西村悠樹
2. 発表標題 ラフバス解析による非ホロノミックシステムの安定化制御
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 西村悠樹
2. 発表標題 ラフバス解析が導く確定システムと確率システムの関係性について
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 原希実, 西村悠樹
2. 発表標題 非線形確率システムにおける概有界化設計
3. 学会等名 第49回計測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宇都太賀, 西村悠樹
2. 発表標題 滑らかでないリャプノフ関数を用いた非ホロノミックシステムのノイズによる安定化
3. 学会等名 第49回計測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内康貴, 西村悠樹
2. 発表標題 ラフバス解析が導く非線形システムの隠れた制御入力
3. 学会等名 第49回計測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

鹿児島大学工学部機械工学科西村研究室 <a href="http://www.mech.kagoshima-u.ac.jp/~yunishi/">http://www.mech.kagoshima-u.ac.jp/~yunishi/</a>
---

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