

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656107

研究課題名（和文）生体制御系におけるゆらぎの安定性と通信ネットワーク型分散制御システムへの応用

研究課題名（英文）Stability of fluctuation in biological control systems and its application to distributed networked control systems

研究代表者

山本 茂（YAMAMOTO SHIGERU）

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：70220465

研究成果の概要（和文）：本研究は、生体制御系にみられる「ゆらぎ」と「遅延」を活用する制御の構造を遅延時間確率微分方程式を用いて解析し、「ゆらぎ」と「遅延」が本質的に避けられない通信ネットワーク経由の分散制御系への適用可能な新しい制御原理を導き、その解析と設計の基礎を築くことを目的とするものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to investigate a mechanism of biological control systems in which fluctuation and time-delay play an important role by using stochastic delay differential equations. In particular, development of analysis and synthesis methods applicable to distributed control over the communication network.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	0	1,400,000
2010年度	800,000	0	800,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	270,000	3,370,000

研究分野：システム制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：フィードバック制御，人間機械系，ゆらぎ，時間遅延，時間遅延微分方程式，確率微分方程式，

## 1. 研究開始当初の背景

通信ネットワークを介した分散制御系において、通信ネットワークを経由する情報伝達による遅れの「ゆらぎ」が避けられない。この遅れと揺らぎを如何に抑えるのかということが従来研究の主眼であった。ところが、遅れとゆらぎの存在は生体の運動制御系や代謝系などに見られ、制御系としてうまく機能している。このゆらぎと遅れに関する研究は、物理学や数学の世界で古くから盛んに行われ、ゆらぎの作用によってシステムが有効に機能する幾つかの事例が見出されてきた。

様々な研究成果は武者利光らが中心となつてまとめた「ゆらぎの科学」に見ることができる。また、文部科学省科学技術振興調整費先端融合領域イノベーション創出拠点の形成「生体ゆらぎに学ぶ知的人工物と情報システム」でも生体や自然界に普遍的に見られる「ゆらぎ」を利用した制御技術の開発が積極的に進められている。しかし、生体制御系のメカニズムを通信ネットワークを介した分散制御系に組み込み、遅れのゆらぎを積極的に利用しようとする試みはなかった。

## 2. 研究の目的

「ゆらぎ」を活用する制御の構造を明確にし、解析と設計の基礎を築くことを研究の目的とした。特に、ゆらぎの安定性を達成するゆらぎ制御則の導出を目指し、生体の運動制御のモデルとして提案された遅れ確率制御を制御論的に検証し、遅れ確率制御を包含する新たな制御原理を導出することを目指した。また、通信ネットワークを経由して情報を伝達する制御システムへゆらぎ制御則を適用する。ゆらぎ制御則を分散制御系へ実装するために必要となる新しい量子化器やアクチュエータを提案することも目指した。

## 3. 研究の方法

本研究の第1の目的は、ゆらぎの安定性を達成するゆらぎ制御則の導出であるため、本研究で扱うゆらぎの確率的安定性の定義を明確にし、その後の研究展開の礎となる以下の項目を中心に研究を進めた。また、本研究の第2の目的であるゆらぎの安定性を達成するネットワーク型分散制御系の構成についても取り組んだ。

(1) ゆらぎの生成メカニズムの調査：「ゆらぎ」が見られる生体の運動制御のモデルを詳細に調べ、「遅れ」と「ノイズ」の存在下での「ゆらぎ」のメカニズムを調べた。

(2) ゆらぎの確率的安定条件の導出：前項(1)の結果と遅れを含む確率微分方程式（遅れ確率微分方程式）の解の性質を調べ、ゆらぎ制御則の導出に適したシステム表現（モデル）を導き、問題の定式化を行う。さらに、ゆらぎの確率的安定性の定義を明確にし、確率的安定条件を導出する。この過程で、より一般的な結果を導くために、前項の調査の対象となったモデル以外も考察の対象とした。

(3) フィードバック系のゆらぎの安定解析と安定化：ゆらぎの安定性に関する(1)で対象としたモデルの特徴を損なわないようなフィードバック系の構造について考察を行い、確率的安定性に関する(2)の結果をもとに、「遅れ」と「ノイズ」の存在下でのフィードバック系の確率的安定解析と（通信ネットワーク型分散制御システムに適用できるような）ゆらぎ制御則の導出を試みた。なお、人の運動制御による倒立振り子系に限った解析が既に行われており、これら既存の結果との関連も考察の対象とした。

(4) 通信ネットワーク型分散制御システムへの応用：前項(3)の結果をもとに、通信ネットワークを経由して情報を伝達する制御システムの構成法（特に時変の伝送遅延やパケット消失を伴うネットワーク分散型制御系においてゆらぎを利用する補償器の構成法）について検討を行った。また、ネットワークを介する制御では、通信路の通信容量の有限性から、制御対象の入出力が離散的な

値に制限される。連続値の信号を離散値に変換する量子化器を最適に設計することを考えると、動的な量子化が適していることが最近の研究で明らかになっているので、動的量子化とゆらぎのメカニズムを融合した新しい量子化器やアクチュエータの構成法の検討を行った。

## 4. 研究成果

生体の運動制御、特に直立動作やスティックバランスなどの数式モデルとして、図1の倒立振り子モデルをもとにしてこれまでに提案されている確率制御と遅れ時間システムの安定性の条件を詳細に調べた。

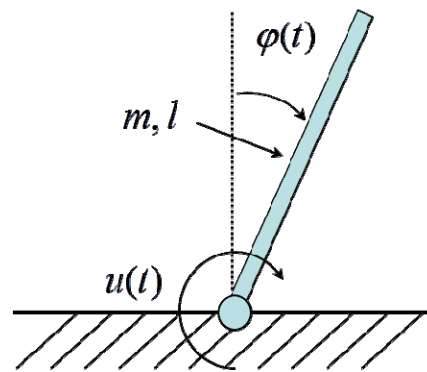


図1

まず、人間の制御方法に近いであろうと考えられる制御法（モデルなし予測制御法）によって倒立振り子を制御する数値シミュレーションを行い、フィードバックループ内に存在する許容できる時間遅延が通常用いられるフィードバック制御より長くなることを確認した。モデルなし予測制御法では、過去のメモリーと現状とを参照しながら操作量を決定するため確率ゆらぎが生じていると考えられたが、確率的な要素を理論的に考察するには適当ではなかった。

確率的な評価を適切に行うため、角度の時間遅れ項を用いてフィードバック制御を行う倒立振り子モデルを二次の時間遅延方程式で記述し、確率微分を導入して確率時間遅延微分方程式を導いた。この確率時間遅延微分方程式を導く過程で、既報の条件では一部不十分などところがあることを明らかにした。さらに、微分方程式の解の確率安定性の条件の理論的な導出を試みたが、十分な成果を得るまでには至らなかった。

そこで、生体の運動制御の最も簡単なモデルとして考えることのできる一次の確率時間遅延微分方程式の解の安定性を調べたところ、適切な大きさの確率的係数変動によって、時間遅延の安定性に与える悪影響を抑制できることを確認した（図2）。

さらに、遅延微分方程式の解の二乗モーメ

ント漸近安定条件を理論的に導出することによって、時間遅延微分方程式の係数空間において、解が二乗モーメントの意味で安定となる領域を表現することができ、適度な強度のゆらぎが加わることによって、時間遅延方程式の解の安定領域が拡大することが図3のように示された。

また、通信を介した遠隔操作についても考察を行い、操作性の新たな指標として2ポートネットワークシステムの特性に基づくものを導出した。さらに、通信を介した遠隔操作法での確率的变化検出法の検討も行って、ゆらぎを利用した制御法の実装を試みたが、十分な成果を得ることができなかった。加えて、高速道路の渋滞のモデルとして運転手の操作遅れを表現できるオートマトンモデルを用いて、操作遅れを解消することにより渋滞抑制を行う手法への応用も考察した。

フィードバック制御ループ内に存在する時間遅延の悪影響をフィードバックゲインの確率的ゆらぎにより低減できることを理論的に示すことができたのは、制御システムがスカラのダイナミクスで表現される場合に限られている。したがって、通信を介した遠隔操作法などの高次の制御システムに得られた結果を直接適用することは困難であった。今後は、より現実のモデルに近い高次の時間遅延確率微分方程式に対する解析が必要で、そのための解析法を確立する必要がある。

$$dx(t) = (ax(t) + bx(t - \tau))dt + cx(t - \tau)dw(t)$$

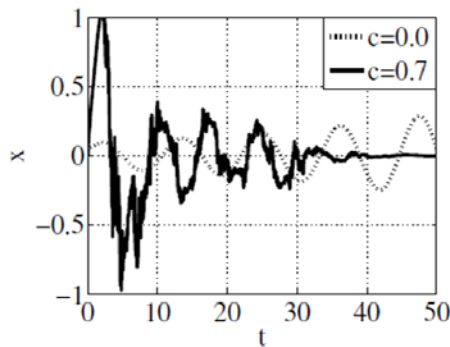


図2

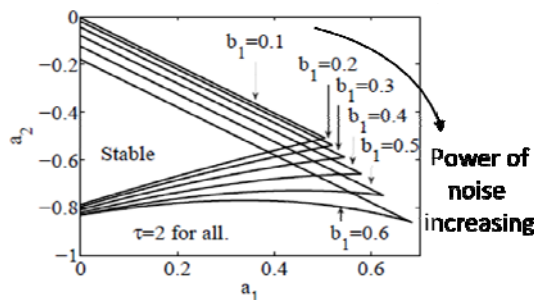


図3

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Peng Xue and Shigeru Yamamoto, Asymptotic Mean Square Stability Analysis for a Stochastic Delay Differential Equation, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 5, No. 3, 印刷中

[学会発表] (計 8 件)

- ① Peng Xue and Shigeru Yamamoto, Convergence and Confidence Intervals of a Stochastic Differential Equation, The 43rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 2011年10月29日, 立命館大学 (滋賀県)
- ② Peng Xue and Shigeru Yamamoto, On mean square stability of a stochastic delay differential equation, SICE Annual Conference 2011, 2011年9月14日, 早稲田大学 (東京都)
- ③ Peng Xue, Shigeru Yamamoto, and Yosuke Ikei, Moment stability in mean square of stochastic delay differential equation, The 23rd Chinese Control and Decision Conference, 2011年5月25日, Mianzhou Hotel, Mianyang (China)
- ④ Xue Peng and Shigeru Yamamoto, On Second Moment Stability Conditions of a Stochastic Delay Differential Equation, 第11回計測自動制御学会制御部門大会, 2011年3月18日, 琉球大学 (沖縄県)
- ⑤ 清田 将太, 山本 茂, 拡張 Burgers セルオートマトンモデルに基づく渋滞抑制制御, 第43回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2011年3月1日, 北海道大学 (北海道)
- ⑥ Hon Fai Lau and Shigeru Yamamoto, Bayesian Online Changepoint Detection to Improve Transparency in Human-Machine Interaction Systems, 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2010年12月16日, Hilton Atlanta (USA)
- ⑦ Pailin Jiewpaibul and Shigeru Yamamoto, A Human Motor Control Model based on Model-free Predictive Control, The 3rd Thailand-Japan International Academic Conference, 2010年11月19日, 名古屋大学 (愛知県)
- ⑧ Hon Fai Lau and Shigeru Yamamoto, Network Interpretation of a Human-Machine Interaction System, the 7th Asian Control Conference, 2009年8月29日, Hong Kong Convention &

Exhibition Center (Hong Kong)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 茂 (YAMAMOTO SHIGERU)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：70220465