

機関番号：34406

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760273

研究課題名（和文） ダイナミクスにゆらぎをもつ確率システムの理論的性能解析と
人の運動制御系への応用研究課題名（英文） On the Theoretical Stability Analyses and its Application of a
Stochastic Control System with Dynamics Fluctuation

研究代表者

牛田 俊 (USHIDA SHUN)

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号：30343114

研究成果の概要（和文）：従来の多くの制御系設計において、ゆらぎやノイズといった不確定要素は、制御性能を低下させる要因として制御系からできるだけ排除される存在であった。この事実とは対照的に、本研究課題では、ゆらぎの発生源を制御器に積極的に取り入れることでより良い制御性能が達成可能になることを、理論的な安定解析・時系列解析、数値実験、さらに、台車とシーソーからなる制御装置による実験を通じて明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focus on two properties, time delays and random fluctuations in human motor control mechanism, and investigate the effects of the fluctuation to the stability and a behavior of the stochastic linear systems with the time-delay. The control performance improvements due to fluctuation are shown from both aspects of numerical/practical simulations and its theoretical analyses.

For a conventional controller design, a random component such as fluctuation was a target to be eliminated from a system as a factor causing performance reduction. In contrast to this fact, the results in this paper suggest that an appropriate fluctuation in control systems can achieve the better control performances.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：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：確率システム、ゆらぎ、運動制御

1. 研究開始当初の背景

生物が営む様々な生命活動は、極めて精巧な制御メカニズムに支えられている。ここで述べている生命活動とは、システム生物学に代表される遺伝子や細胞レベルの制御、ホメオスターシスといった臓器レベルの制御、脳が司る固体レベルでの人の運動制御を指す。これらの幅広い観点に対して多くの研究者

の関心が集まり、生物の制御メカニズムの解明に向け制御生物学と呼ばれる研究分野が創成されつつあった。

この制御生物学では、確率共鳴現象や 1/f ゆらぎをキーワードとして、様々な人の生命活動の営みにおいてゆらぎが重要な役割を果たしていることが報告されてきた。その一例が、感覚器の高感度化による平衡維持能力

の向上や、健常者の心拍数や血圧の維持である。

本研究課題で扱うテーマは上で述べた人の運動制御であり、そのメカニズムや振舞いに特徴的に現れるむだ時間とゆらぎを取り扱う。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は次の2つである：

- (1) 人の視覚運動制御系を模擬した現実のロボットシステムにゆらぎの要素を実装して、実機を用いて「ゆらぎのような不確定要素が、制御系の性能に対してポジティブな影響を与え得る」という仮説を実証することである。
- (2) より現実的なシステムやモデルに対して理論的な安定解析を行い、実証実験により大きな説得力を持たせることである。ここで、「より現実的な」系とは、現実に存在する制御系を指す。

人の運動制御系という複雑なシステムのメカニズムの本質を見極めるために、我々の研究を含めて今までの研究では、簡単なモデル、シンプルな制御系、単純なゆらぎの構造に限って解析が行われてきた。たとえば、倒立振り子を線形モデルで近似をし、制御器としては古典的な比例微分積分(PID)制御を採用している。これらに対し、人の運動制御系に即したより複雑で高度な制御器を提案することが、今までの研究成果を進展させていくべき方向性である。我々はゆらぎを含まない確定システムとして人の視覚運動系のモデルを構成し、記憶や学習のスキームやその挙動を調べてきた。これらの高度な知的制御系におけるゆらぎの役割を明らかにすることで、複雑な人の運動制御メカニズムの解明にアプローチする。

3. 研究の方法

本研究課題では、図1のシステムのむだ時間とゆらぎに焦点をあて、特にゆらぎが系の安定性および制御性能におよぼす影響を、理論的、数値実験的な視点から解析する。

(1) 対象とする制御系は、上で述べた人の視覚による Stick Balancing タスクを模擬したむだ時間を含む倒立振り子システムであり、ダイナミクスにゆらぎを含む制御器を取り入れた確率システムとしてモデル化する。このシステムに対して、以下の手順で解析を行う(図2)。

まず、ゆらぎが存在しないという仮定の下で、むだ時間系に対する安定条件を導く(結果1)。この確定システムに対する条件は、ゆらぎが存在する確率システムに対する安定条件との比較基準として用いられる。さらに、数値シミュレーションにより、制御系の比例

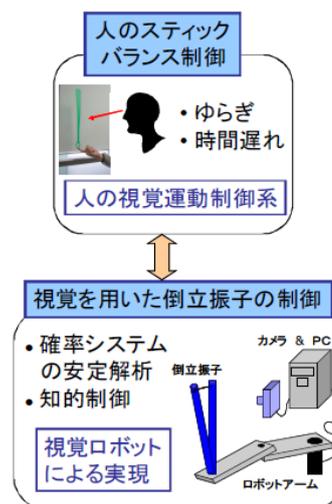


図1 生物制御学における人の運動制御系の例

	確定システム (ゆらぎなし $w(t) = 0$)	確率システム (ゆらぎあり $w(t) \neq 0$)
理論解析	結果1 むだ時間系の安定条件	結果3 なぜゆらぎが正の影響を及ぼすのか?
数値シミュレーション	結果2 むだ時間系でのゆらぎの正の影響	ゆらぎとむだ時間との関係 メカニズムの解明 ①安定性の拡大 ②適応性の向上
実機実験	[Image of experimental setup]	

図2 本研究課題のアプローチ

フィードバックゲインに適切な大きさのゆらぎが介入すると、むだ時間系の安定性と速応性が共に向上することを示す(結果2)。

最後に、むだ時間のない確率システムの安定性について理論解析を行うことにより、数値シミュレーションで確認された、ゆらぎが系の安定性を向上させるメカニズムを明らかにする(結果3)。

系に不規則なゆらぎが介入する確率システムでは、その安定性の定義や微積分演算等は確定システムのそれとは異なるため、注意を要する。

(2) 上述の「ゆらぎという不確定要素が、制御系の性能に対してポジティブな影響を与え得る」という理論的な予測に基づいて、現実の制御実験装置を用いた実証実験を行う。実験結果を通じて、誰にでも理解しやすく、かつ、有用な工学的応用を実現し、ゆらぎの効果とその利用可能性を広くアピールすることができる。

実際の実験装置としてシーソーと台車からなる不安定系を採用し、その制御装置にゆらぎを含む制御器を実装する。このとき、不安定な領域に閉ループ系の極が配置されたフィードバック系に対して、ゆらぎに起因して系の安定限界が広がり、不安定システムが安定化されることを示す。結果として、ゆらぎが制御系に正の影響を与え得ることが、数

値計算および実機実験の両面から実証される。

4. 研究成果

(1) 確率システム理論に基づく安定性能改善の可能性

人の運動制御のメカニズムを解明し理解するという事は、工学的な人工物として、同等の機能、性能、振舞いをもつ知能機械を複製できることに相当する。そこで、人の視覚と指先による Stick Balancing の制御系を、倒立振り子制御装置を用いた安定化実験によって模擬した。倒立振り子制御装置は、振り子、アクチュエータ(台車、ロボットアーム等)、それらの角度や位置を知るためのセンサ(ロータリエンコーダ、カメラ等)から構成される。振り子の角度情報をカメラで検出する場合、汎用のカメラと処理装置では画像の取得と画像処理に時間がかかるため、取得される振り子の角度情報にむだ時間が生じてしまう。その結果 50ms 程度のむだ時間が生じるだけで、たちまち安定化制御が困難になる。この物理系を 2 次遅れ系としてモデル化し、制御入力にゆらぎを含む比例制御則を導入した。この制御則の最も大きな特徴は、比例ゲインとして、通常制御器に頻繁に使われている定数ゲインに加えて白色性のゆらぎが付加されていることである。モデル化された制御系のブロック線図を図 3 に示す。

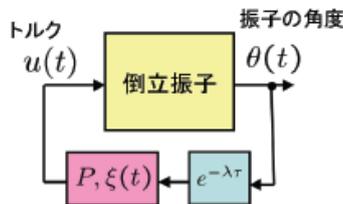


図 3 倒立振り子安定化制御系のブロック線図

図 3 のシステムは、ゆらぎに起因して系のダイナミクスが時間と共に変動する時変システムであり、その変動の不規則性から確率システムとなる。さらに、むだ時間要素に起因して、図 3 は無限次元システムとなる。これらの事実は、時不変有限次元確定システムの場合に比べてシステムの構造が大幅に複雑になることを意味している。

① むだ時間制御系の安定条件(結果 1)

モデル化した制御系において、ゆらぎがないという仮定の下で確定システムの理論的な安定解析を行った。ここでは直接法と呼ばれる方法を用いて、むだ時間を含むシステムの安定条件を導出した。

② ゆらぎによる制御性能の向上(結果 2)

モデルのパラメータを図 1 の実機を参考に設定し、振り子の振舞いをシミュレーションより求めた。様々な振り子の長さの逆数(横軸)とフィードバックの定数比例ゲイン(縦軸)

について、安定・不安定の判別を行った。図 4 において、赤い○印と青い×印はそれぞれ安定領域と不安定領域を表している。

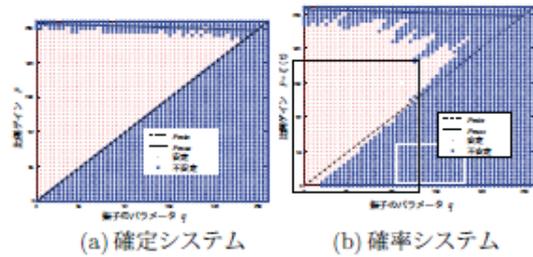


図 4 システムの安定領域

ゆらぎが介入する確率システムを(1)で述べたゆらぎのない確定システムの理論的な安定境界と比較すると、以下のような事実が明らかになった。

- ・むだ時間システムに不規則な信号のゆらぎが介入しても安定領域の形に大きな乱れは起こらない。
 - ・定数ゲインと振り子の長さの逆数が小さい値をとるとき、ゆらぎを加えると安定領域が広がる。
 - ・横軸の振り子のパラメータが大きくなると、ゆらぎの存在により、理論的な安定領域内でも系の安定性は保証されない。
- この結果において、振り子の長さの逆数が大きくなると振り子の長さが短くなることに相当し、制御が困難になることは直感的に理解できる。

この系は不規則な信号が含まれている確率システムであるため、複数の見本過程からその統計的な性質を調べる必要がある。今回は各パラメータに対して 8 回ずつの試行を行った。

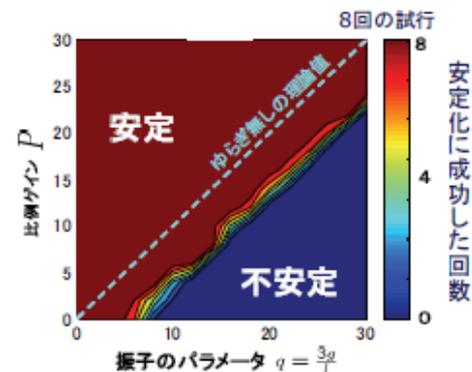


図 5 ゆらぎを加えたときの安定領域

図 5 において茶色の部分は 8 回の試行が全て安定になった領域、青色の部分は全て不安定になった領域、その間は順に安定になった回数に応じて色分けしている。この結果から、系が安定となるパラメータ領域が、ゆらぎがない確定システムの場合に比べて広がっていることがわかる。すなわち、同じ振り子の長

さの設定で系を安定化できるフィードバック比例ゲインの範囲はより広くなり、さらに、同じ大きさの比例ゲインで安定化できる振子の長さの範囲が大きくなったことを意味する。したがって、系のダイナミクスにゆらぎが何らかの影響を与え、系の安定領域が広がるという意味で、ゆらぎがプラスの影響をおよぼしていることが明らかになった。

(2) ゆらぎによる系の収束性の向上

図5の理論的な安定境界内のシステムに対して系の時間応答を観察した結果、図6に示すように、ゆらぎを加えた場合の方が零に早く収束することが確認された。したがって、ゆらぎは系の振舞いの速応性を高める効果があることがわかった。

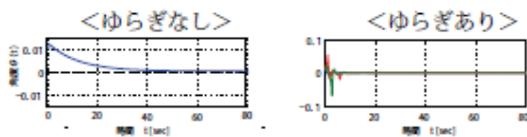


図6 ゆらぎによる系の収束性の改善

(3) ゆらぎによる系の挙動変化のメカニズムについての理論解析

上の確率システムの数値シミュレーションの結果を裏付けるために、確率システムに対する理論解析を行った。

Wiener過程を用いて、確率システムの確率1で安定であるための条件を以下の手順で導出した：伊藤の公式を用いて、システムを伊藤形微分方程式に書き直す。このシステムに対して、伊藤の微分生成作用素を求める。極座標変換を施し、Hasminskiiの条件を計算すると、安定条件が求まる。

この理論的な安定境界を描かせると、図7となった。

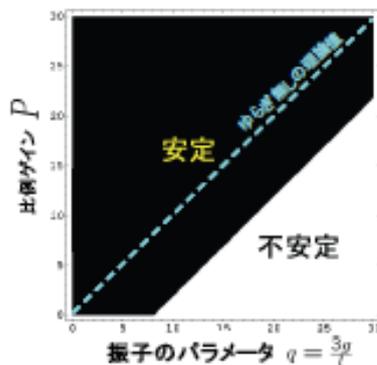


図7 理論解析による安定境界

図7の安定境界は、数値シミュレーションによって得られた図5の安定領域とほぼ一致している。このことは、本研究課題の安定解析によって、ゆらぎによる性能向上のメカニズムを検証することが可能であることを示唆している。安定解析により、ゆらぎが介入

すると安定領域が広がるということが理論的に示された。

本研究課題では、人の運動制御メカニズムにおいて、むだ時間とゆらぎに焦点をあて、むだ時間システムの制御性能の改善にゆらぎが利用可能であることを、数値シミュレーションおよび理論的な安定解析によって明らかにした。従来の多くの制御系設計においては、ゆらぎのような不確定要素は排除される存在であったが、本研究課題の結果は、ゆらぎの発生源を制御器に積極的に取り入れることで、より良い制御性能が達成可能になることを示唆している。

(4) 実際の制御装置による実証実験結果

本研究課題で得られたゆらぎによる制御性能改善に対する理論予測を、実機実験によって実証した。ここで採用した実験装置は、図8のシーソー (Seesaw) と台車 (Cart) からなる不安定な機械システムである。台車には駆動源として DC モータが搭載されており、シーソー上を並進運動する。台車の車輪であるピニオンギアはシーソーのラックと噛み合っており、台車はスリップを起こさない。シーソーと地面はフリージョイントで結合されており、台車の重心が移動することによってシーソーが傾く。台車の位置とシーソーの傾きはポテンシオメータによりリアルタイムに計測することができる。

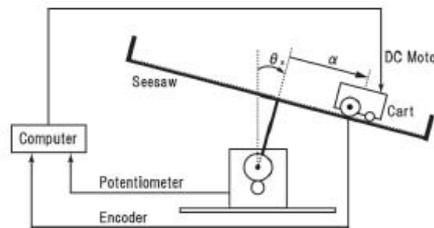
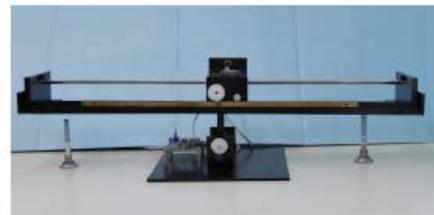


図8 実機による実証実験

このシーソーは本質的には理論解析における倒立振り子系と等価な2次システムである。さらに、並進運動をする台車を備えていることから、台車の位置と速度、シーソーの角度と角速度を状態変数にとると、本実験装置は4次システムと見なすことができる。DCモータの電気的な動特性を考慮してモデルを構築し、シーソーの不安定平衡点近傍で線形化して数学モデルを構築した。この数学モデルを用いて、ゆらぎを含むフィードバック制御

器による安定化の数値実験を行い、ゆらぎによる不安定システムの安定化を確認した。

さらに、ゆらぎを含む制御器を図8の実験装置に実装した。現実のシステムでは、シーソーの可動範囲や DC モータへの入力電圧には制限があるため、付加することのできるゆらぎの大きさにも制限が加わる。すなわち、実現可能な入出力の範囲内に収まるように比例ゲインやゆらぎの大きさを設定する必要がある。

まず、ゆらぎを加えない場合を考え、閉ループ系の極を不安定になるように極配置した。したがって、シーソーは可動範囲の限界(図9破線)に達している。実際には、シーソーが一定時間間隔毎に限界傾斜角度に到達したとき床面との衝突現象が起きている。比例ゲインは、不安定極を配置したことにより不安定化制御器となってしまっている。

次に、この不安定化比例ゲインを固定したまま、ゆらぎを付加した実験結果を図10に示す。シーソーは床面と衝突することなくバランスをとり、ゆらぎの効果により台車は安定化されている。DC モータへの入力電圧はゆらぎによって高周波成分が強調されていることがわかる。また、印可電圧の最大値もゆらぎのない場合に比べて増大しているが、安定化に必要なエネルギーが消費されている結果であると解釈できる。

以上の結果より、ゆらぎを含まない確定システムとしては不安定化してしまう制御系に対して、ゆらぎを含む制御器を用いて不安定化現象を解消し、安定性能を向上させ得ることが実機における実験によっても確かめられた。本研究課題の実証実験結果は、確率システム理論に基づいた安定性能改善の予測を裏付けるという意味で、重要な意義をもつ。

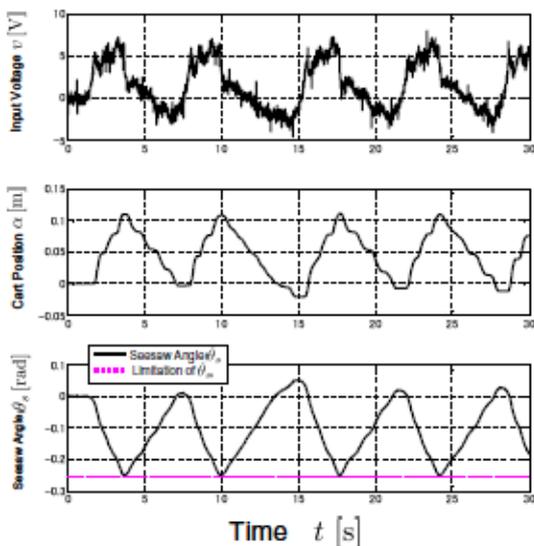


図9 実機による実証実験結果(ゆらぎなし)

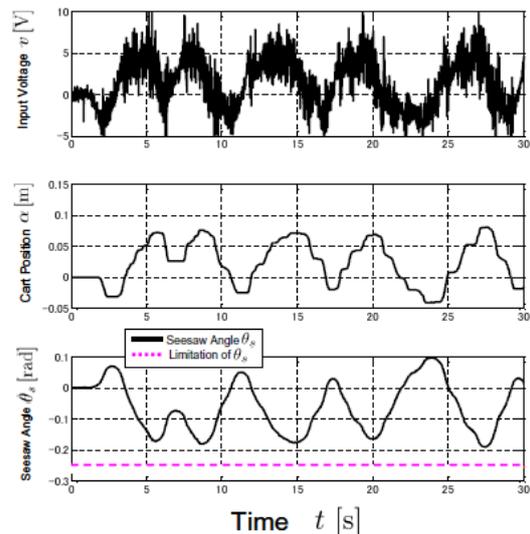


図10 実機による実証実験結果(ゆらぎ有り)

まとめ：

本研究課題では、シンプルな比例制御則によって安定限界付近で動作している不安定な物理系が、ゆらぎを含む比例制御器によって安定化されることを理論解析、数値シミュレーションおよび実機実験によって実証した。この事実は、研究代表者らの確率システム理論に基づく理論解析によって予測されていた結果であり、ゆらぎのような不確定要素が、制御性能をポジティブな影響を与え得るのか？という直感的にはっきりとしない問題に一つの答えを与えている。制御系設計に携わる者は、ゆらぎ、雑音、確率的な事象といった不確定要素をシステムから排除する制御手法を考えがちであるが、逆に、ゆらぎを有効に活用して制御性能の向上を図る可能性を実証したところに本論文の結果の意義がある。

今後の課題は、なぜダイナミクスに含まれるゆらぎによって系の制御性能の改善が生じるのか？という本質的な疑問に答えることと、理論では説明ができない巧みな人の運動制御のメカニズムの解明に应用することである。これらの実現のためには、実機実験上の物理現象のさらなる解明による工学的応用の模索と、確率システムやハイブリッドシステムの理論に基づいた数理モデルの解析、すなわち、実験と理論を車の両輪として発展させていくことが必要不可欠である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① 生田俊、篠原暢宏、東俊一、丸田一郎、杉江俊治、ゆらぎによる安定性能改善の理論予測に基づいた実証実験、第11回計測自動制御学会制御部門大会、2011年3月16日、琉球大学

- ② 牛田俊、ゆらぎを含む確率システムの安定性に関する一考察、計測自動制御学会 第 39 回制御理論シンポジウム、2010年9月27日、ホテルコスモスクエア国際交流センター
- ③ 牛田俊、ロボットアーム駆動型倒立振り系の安定化に対する確率論的アプローチ、計測自動制御学会 第 38 回制御理論シンポジウム、2009年9月14日、大阪、ホテルコスモスクエア国際交流センター
- ④ 石川将人、牛田俊、生物と機械に共通する力学原理を求めて、第 53 回システム制御情報学会研究発表講演会、2009年5月20日、神戸、神戸市産業振興センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛田 俊 (USHIDA SHUN)
大阪工業大学・工学部・講師
研究者番号：30343114

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し