

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420431

研究課題名(和文) 制御性能の向上に寄与するゆらぎのメカニズムの解明とその工学的応用

研究課題名(英文) Application on Performance Improvement Mechanism for Stochastic Control Systems with a Dynamics Fluctuations

研究代表者

牛田 俊 (Ushida, Shun)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30343114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：従来より、ゆらぎといった不確定要素は制御系を乱す外乱であるという固定観念があったが、研究代表者は、制御系に含まれるゆらぎによって制御性能が向上する可能性を理論的に予測した。本研究の目的は、この成果を工学的に有益な実システムとして体现することである。具体的には、ロボットアーム系やカメラ-プロジェクタ系に対し、制御系のダイナミクスにゆらぎを含む系の性能評価を行う実験装置を導入した。特に、見かけの制御系に対してゆらぎの効果について現時点では結論を出すまでには至っていないが、ゆらぎがポジティブな役割を果たす可能性について問題点を明らかにすることができ、工学的な応用に向けて着実に前進しているといえる。

研究成果の概要(英文)：In human motor control mechanism, there is remarkable property, the existence of random fluctuations. In this study, we focus on practical application of the property and investigate the effects of the fluctuation to a stability and a behavior of a stochastic linear systems. In our previous work, the control performance improvements due to fluctuation were shown from both aspects of numerical simulations and its theoretical analyses. Our results in this paper suggest that an appropriate fluctuation in control systems can achieve the better control performances. Actually, we constructed such a control system for robot arm with the inverted pendulum and a camera-projector appearance control system. We investigated some problems for the implementation of fluctuation to the real systems, which shall be useful for further developments of our stochastic control system.

研究分野：制御工学

キーワード：ゆらぎ 見かけの制御 メカニカルシステム

### 1. 研究開始当初の背景

従来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系を乱す外乱であるという固定観念があった。一方、研究代表者は人の運動制御に注目し、そのメカニズムや振舞いに特徴的に現れるゆらぎの現象を、確率システムモデルを用いて表現し、それを用いてゆらぎが制御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、ロボット工学的な視点から解析した。

対象とする制御系は、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した。棒を手の平の上で立てる運動制御は、倒立振子安定化という制御工学・ロボティクスでよく扱われる典型的な制御系である。

我々は、ダイナミクスにゆらぎを含む確率制御システムモデルを提案し、その安定性や時間応答を理論的に解析することに成功した。確率システム理論における伊藤の確率微分方程式によるモデルの表現や安定解析の手法を用いて、数値シミュレーションによる時間応答の解析を重ねることにより、「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」という仮説に到達した。

さらに、シンプルな構造のシーソー・台車からなる制御装置を用いた実証実験を行い、メカニカルシステムを用いて上述の予測を実機実験により自ら確かめた結果が注目を集めた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は次の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により仮説を実証すること

(2) 誰にでも理解しやすく、かつ、有用な工学的応用を実現することで、ゆらぎの効果とその利用を広くアピールすることである。ここで、(2)の「工学的応用」は(1)の既に保有しているロボットシステム上に限った話ではなく、収束の遅いシステムや、不安定化を起こしやすい安定限界に近いところで動作しているシステムのダイナミクスにゆらぎを加えることを想定している。

具体的には、大学の学部レベルの実験で制御工学のテーマとして取り上げられる倒立振子、タンク水位調節系、磁気浮上系をはじめとして、不安定現象が随所に現れる小型無人ヘリコプタの自動操縦系、船舶の振動系といった誰にでも分りやすい題材を用いることを想定している。すでに、研究代表者は、シーソー・台車からなる制御装置を用いた実証実験に成功している。さらに、有効な工学的応用を探索するためには、数値シミュレータによるゆらぎの印加実験を繰り返してゆらぎの影響を調べつつ、試作機の製作するこ

とが必要である。工学的な応用はできる限りシンプルな構造で実現し、確率システム理論に基づく手法を適用してゆらぎのメカニズムの解明を試みる。実現される実機によるデモシステムは、誰に対してもわかりやすく説得力をもって現象を理解してもらうことが可能となるだけでなく、様々な工学的な応用の先駆けとなり得るものである。

### 3. 研究の方法

(1) カメラ-ロボットアーム-倒立振子系やカメラ-プロジェクタ系をプラットフォームとして利用し、制御系のダイナミクスにゆらぎを含む場合の制御性能評価を行った。

具体的には、数値シミュレーション実験と実機による実験の両側面から、ゆらぎが振子の安定化と時間応答性能に与える影響を明らかにするための方法論を模索することである。倒立振子系のシミュレータは、将来の2リンク2自由度のマニピュレータの実装を見込んで汎用性を重視して設計を進めてきた。実機実験では、ロボットアーム上に倒立振子の物理系がすでに設置されているが、振子の長さ・重さ・慣性モーメントを自由に設定できるように一から設計をやり直す必要がある。なぜならば、確率モデルに対する安定解析では、制御器のゲインと制御対象である振子のパラメータの二つを可変な設計パラメータとして用いてきたからである。

(2) カメラ-プロジェクタ系では見かけの制御を行う際のモデル予測制御のアルゴリズムへゆらぎを導入することを試みた。これらの成果は今後の工学的な応用を探索する切口となるため、特に実機による実験を様々な条件設定の下で行い、ゆらぎの効果の性能評価に力を注ぐことに主眼を置いている。

### 4. 研究成果

(1) カメラ-ロボットアーム-倒立振子系やカメラ-プロジェクタ系をプラットフォームとして利用し、制御系のダイナミクスにゆらぎを含む場合の制御性能評価を行うための実験装置の導入、設置を行った。本研究課題のロボットシステムにおける重要なトピックの一つは「むだ時間補償」であった。汎用の標準的で安価な30fpsのカメラを用いてむだ時間を再現してきたが、本研究課題では、制御性能の良し悪しの原因を「ゆらぎ」「むだ時間」の間で切り分けるために、高速な視覚系を導入し、ゆらぎとむだ時間を含む制御系に対する性能評価を行う環境を整えた。

ゆらぎによって倒立振子安定化制御系の安定境界付近の振る舞いが変化することが、理論解析と数値シミュレーションによって示されている。このことはシーソーカートシステムと同様にゆらぎによって安定化ゲインの領域の拡大が観測されることが示唆されている。

(2) 人型ロボットへのゆらぎの応用として、コンプライアンス制御に基づく人型ロボットの関節の力制御系を取りあげた。力制御系を構築するためには、関節に作用する外力の精度のよい推定が必要となるが、力を測ることは原理的に観測ノイズの影響を受けやすく、その計測は本質的に難しい問題である。そこで、本研究では、関節を構成するサーボモータの動的モデルを得るために適応同定器を導入した。得られたモデルに基づいてコンプライアンス制御系を構成し、最終的にはゆらぎを含む制御器を実装することを模索した。

(3) 上述のロボットシステムに対するゆらぎの印加実験に加え、メカニカルシステム以外の様々なシステムへ適用を目指した。その一つがカメラ-プロジェクタからなる見かけの制御系である。このシステムは、モデル予測制御に基づく繰り返し計算により実現されており、処理時間の遅れをむだ時間としてモデル化することができる。むだ時間の影響は見かけの制御の被投影物が移動した際の残像として現れ、深刻な性能劣化をもたらす。この問題の解決策の一つとして、ゆらぎによる性能改善の可能性を模索した。

具体的には、見かけの制御系の残像の抑制に関してむだ時間のモデルを導入し、性能の改善を図った。画像処理系に対してゆらぎの効果について現時点では結論を出すまでには至っていないが、ゆらぎがポジティブな役割を果たす可能性について実装上の問題点を明らかにすることができ、工学的な実用化に向けて着実に前進しているといえる。

## 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)

### 〔雑誌論文〕(計2件)

島名 功, 天野 敏之, 生田 俊, プロジェクタカメラ系による全周囲の見かけの操作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, 21 巻, 2016, pp. 363-371

河野 邦起, 生田 俊, 天野 敏之, プロジェクタとカメラを用いた見かけの制御に対するむだ時間補償アルゴリズムの提案, システム制御情報学会論文誌, 査読有, 29 巻, 2016, pp. 93-100

### 〔学会発表〕(計10件)

林 幹哉, 小出 祐介, 松原 航平, 生田 俊, 奥 宏史, W. Kongprawechnon, RC サーボモータに対する適応同定器を用いたパラメトリックモデル同定と力制御系設計, 計測自動制御学会関西支部 若手研究発表会, 2017年01月13日, 大阪大学 (大阪府・吹田市)

M. Hayashi, K. Shibata, S. Ushida, H. Oku, W. Kongprawechnon, Compliance Control of the RC Servo Motor with Adaptive Identifier, SICE Annual Conference (国際学会), 2016年09月21日, Tsukuba International Congress Center, (Ibaragi・Tsukuba)

石川 貴史, 前田 擁平, 池田 佑輔, 生田 俊, 天野 敏之, カメラとプロジェクタからなる光学系を用いた見かけの制御系の性能評価方法の提案, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016年05月25日, 京都テルサ (京都府・京都市)

林 幹哉, 柴田 和諒, 生田 俊, 奥 宏史, W. Kongprawechnon, 外力に対して柔軟な動作を実現する人型ロボットへのコンプライアンス制御, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016年05月26日, 京都テルサ (京都府・京都市)

柴田 和諒, 林 幹哉, 池田 裕一, 生田 俊, 奥 宏史, 電流センサを用いた外力推定に基づくコンプライアンス制御系の構築, システム制御情報学会研究発表講演会, 2015年05月20日, 京都テルサ (京都府・京都市)

河野 邦起, 生田 俊, 天野 敏之, 現実の環境に適した見かけ制御アルゴリズム提案, 平成26年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, 2015年01月16日, 大阪大学 (大阪府・吹田市)

土井 研治, 北村 駿, 生田 俊, 奥 宏史, 平成26年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, 2015年01月16日, 大阪大学 (大阪府・吹田市)

T. Amano, I. Shimana, S. Ushida and K. Kono, Successive Wide Viewing Angle Appearance Manipulation with Dual Projector Camera Systems, the 24rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence, 2014年12月08日, Bremen, Germany

河野 邦起, 河野 陽平, 小山 健太, 生田 俊, カメラとプロジェクタからなる光学系を用いた見かけ制御システムの機能構築, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014年05月21日, 京都テルサ (京都府・京都市)

土井 研治, 北村 駿, 生田 俊, 奥 宏史, レンズ加工機のモータ駆動モデルを用いた制振制御系の性能評価, 第58回シス

テム制御情報学会研究発表講演会，2014  
年05月22日，京都テルサ（京都）

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.oit.ac.jp/laboratory/room/113>

6．研究組織

(1)研究代表者

牛田 俊（USHIDA, Shun）

大阪工業大学・工学部機械工学科・准教授

研究者番号： 30343114