

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656270

研究課題名(和文) 不完全観測情報に基づく制御系設計

研究課題名(英文) Synthesis of Control Systems based on Incomplete Observed Information

研究代表者

杉江 俊治 (SUGIE, Toshiharu)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：80171148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では確率的最適化と確率的制御器を核として、不完全な観測情報しか得られない場合でも、高い制御性能を実現する手法について研究し、以下の成果を得た。まず、観測データ不足を補うためのシステムモデル構築法について検討し、粒子フィルタが有効であることを確認した。また、モデルに基づき低解像度の観測データから元信号を高精度で再構成する手法について検討し、その有効性を検証した。さらに、低解像度の観測データ下においては、あえて確率的な振る舞いをおこなう制御器を導入することが有効であることを、マルチエージェント系の制御、生物系の制御を含む種々の場合において確認した。

研究成果の概要(英文)：This project studies how to design high performance control systems under incomplete observed data by exploiting stochastic optimizations and stochastic controllers. First, particle filters are shown to be effective to construct system models. Then a model-based method to reconstruct the high resolution signals from the low resolution ones is given and its effectiveness is evaluated. Furthermore, it is confirmed that the stochastic behaviors in control are effective to compensate the incomplete observed data through various cases including multi-agent systems and biological ones.

研究分野：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：量子化出力 粒子フィルタ システム同定 確率的制御器

1. 研究開始当初の背景

現実の位置決め機構においては、価格的な制約から低解像度のセンサを使用せざるを得ない場合も多いが、そのような不完全観測情報の下においても、高精度な制御を実現する手法が産業界から求められている。機械システム制御の分野では、量子化された(すなわち、低解像度の離散値信号へ変換された)観測値に基づく制御に関する研究がいくつかみられるものの、対象が機械系のみ、仕様が定速制御に限定される、量子化誤差を白色雑音で近似するなどの問題点があり、手法の一般性においても、また、実現性能においても未だ十分とはいえない。一方、制御理論の分野においては、近年、ネットワーク化制御やハイブリッド制御に大きな注目が集まり、なかでも、量子化された信号を含む制御系の解析や設計に関する理論が国内外で急速に発展してきている。しかしながら、これまでの研究では、不完全観測情報しか得られない場合については、安定性以外の成果はほとんど得られていない。

このような背景において、研究代表者らは、ランダム変数をあえて導入することにより、最適化問題や制御問題において従来非常に困難とされていた課題が解決できる場合がしばしばあることを経験している。たとえば、粒子フィルタや粒子群最適化(PSO: Particle Swarm Optimization)を用いれば、非線形かつ非凸な問題の解を、高い確率で導出できることを経験している [1]。これらを利用すれば、複雑な対象システムでも、そのモデリングが可能になるものと期待され、このモデルが観測データの不足を補える可能性が高い。また、大規模マルチエージェント系などにおいて、各エージェントの制御器にあえてランダム変数を導入し確率的な振る舞いをさせることにより、大幅に情報圧縮された観測信号のみを用いて、従来型の確定的な制御器では決して実現できない機能が得られることも確認している [2]。

関連研究：

[1] 和田, 杉江: Particle Swarm Optimization に基づく周波数領域におけるシステム同定, システム制御情報学会論文誌, Vol. 23, No.10, pp. 236/242 (2010)

[2] 吉村, 東, 杉江: マルチエージェントシステムのブロードキャスト制御, 第 39 回制御理論シンポジウム, pp. 243/248 (2010)

2. 研究の目的

上述した研究背景のもと、本研究では確率的最適化や確率的制御器を核として、不完全観測情報しか得られない場合でも、高精度な制御性能を実現する制御系設計手法の基礎を確立することを目指した。

特に、以下の各項目に関する基礎的な成果

を得ることを目指した。

(課題 1) 量子化出力データ下における確率的手法に基づく制御系設計

(課題 2) 不完全観測情報下における確率的制御器の解析と設計

3. 研究の方法

3.1 課題 1

(a) 確率的最適化を基礎とした高精度モデルの獲得

オンライン制御時の出力データの情報不足を補う基礎は対象システムの精密なモデル化である。本研究では、実用性の観点から飽和入力やヒステリシスなどの現実的な非線形制約を考慮した上で、入出力データに基づきモデル化を行うことを検討する。このときに、粒子フィルタや PSO などの確率的手法に着目した。共に汎用性の高い手法であり、基礎的な検討により、量子化出力データの下での状態推定における粒子フィルタの有効性、非線形系を含む幅広いシステムの同定に対して PSO などの有効性を確認している。しかし、実用上重要となる非線形要素を含むシステムの同定可能性や、線形近似モデルのパラメータの確かさに関する情報について検討する必要がある。その上で、これらの確率的手法の同定問題に対する有効性を検証する。特に粒子フィルタの有効性に関して詳細に検討する。さらに、確率安定性の概念を用いた PSO の収束性に関する既存の成果を基礎として、PSO の解の大域的安定性、収束速度などの性質を検討し、高い信頼性を維持しつつ誰もが容易に利用できる汎用的なシステム同定法の手法の確立を目指す。

(b) 量子化出力に基づく元信号の高精度再構成

本来の出力の滑らかさを考慮に入れ、過去の一連の量子化観測データを用いて現時刻の出力を推定すれば精度が向上することが期待される。予備的な検討として、各サンプリング時刻において多項式で出力を近似し、これとオブザーバを併用して元信号を再構成する方法について考察している。そして、制御対象のモデルが正確な場合に関して、その有効性を確認している。本研究では、この際多項式の次数の決定手法、一般的なカルマンフィルタとの詳細な比較について検討する。また、一般のシステムにおいて出力および状態の高精度再構成手法を確立することを目的とする。さらに、実用的な実験系において、その実装可能性を含め、有効性について検討する。シミュレーションにより検討から始める。これらの成果を統合して、制御器の設計を含めた、制御系全体の設計指針確立を目指す。

3.2 課題 2

(a) 確率的制御器が有効に働く制御問題

の整理

研究者らがそれまでに実施した研究によって、いくつかの制御問題において、確率的制御器（ランダム変数を制御器内部に意図的に導入した制御器）が有効に働くことを確認している。そのような問題のひとつは、複数の移動ロボットに同一の制御指令信号を送り、所期のフォーメーションを構成するようなもの（ブロードキャスト制御問題）である [2]。ふたつ目は、バクテリアの走化性運動（ある空間内で誘引物質を感知し、正確な位置情報を使わずに誘引物質の濃度が最も高い点に寄っていく行動）を実現させるような制御問題である [3]。最後は、制御対象への入力に離散値に制限される場合の制御問題である [4]。まずは、これらを参考にし、確率的制御器のもつ役割を整理し、どのような状況において確率的制御器が必要とされ、それによってどんな利点が生じるのかを明らかにすることを目指した。

（b）確率的制御器の性能評価指標の開発

（a）の結果をもとに、確率的制御器の理論的解析に向けた基礎的な検討を実施する。特に、確率的な振る舞いを捉えるための既存の概念の整理を行い、確率的制御器の性能を適切に測ることのできる評価指標の開発を行う。

関連研究：

[3] 大脇，東，杉江：バクテリアの走化性を司るハイブリッド制御器のモデリング，計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会，1F1-1 (2010)

[4] 森田，東，杉江：フィードバック制御系におけるランダムディザ量子化器の性能解析，第 39 回制御理論シンポジウム，pp. 223/226 (2010)

4. 研究成果

4.1 課題 1

（a）確率的最適化を基礎とした高精度モデルの獲得

（a-1）非線形システムのモデル化：現実的な非線形要素の一つで広く存在するものにバックラッシュ型ヒステリシスがある。入力履歴によってそのふるまいが変化するため取り扱いが難しいものとして知られている。これに対して、幅広いシステムを統一的に扱えるものとして粒子フィルタがある。粒子フィルタは、多数の粒子に推定値の情報をもたせ、観測値との対応から粒子に重み付けしていくことで、推定したい値の確率分布を近似的に求める手法である。この粒子フィルタを用いて、バックラッシュ型ヒステリシス要素と線形システムの複合システムの同定問題について検討した。実際の DC サーボモータを用いてデータを取得し、モデリングを試みた。検証用の入力を用いて、実験データとモ

デルの予測値を比較し、線形モデルだけではとらえきれなかった入出力データの特徴を得られたモデルでよく再現できることを確認した。

（a-2）線形近似モデルの同定：非線形システムを同定する際には、同定手法の簡便さやその後の制御系設計の容易さなどを踏まえ、システムを線形近似し、線形同定法を用いることも実際には多い。しかし、従来の線形同定法では、線形近似の際に生じる近似誤差を取り扱うことができない。そこで、近似誤差自体を新たなパラメータとして同時に同定することを考え、粒子フィルタをこのようなシステム同定問題に適用することを検討した。数値例および基礎的な実機実験によって、一定の有効性があることが確認できた。

（a-3）マルチモデルの同定：対象システムが構造やパラメータ変化を含んだシステムである場合には複数のモデル（マルチモデル）でそのシステムを表現することがある。マルチモデル推定とは、現在のシステムの挙動がどのモデルで表現できるかを推定することである。一般的な非線形システムを対象としたマルチモデルの推定する手法について考察し、粒子フィルタのアルゴリズムを大きく変えることなく、これが可能であることを確認した。

（a-4）PSO による高次系のシステム同定：PSO は線形、非線形に関わらず幅広いシステム同定に応用できることはすでに知見を得ていたが、推定すべきパラメータ数が増える高次複雑系への応用可能性については不明であった。通常の PSO では、10 次元以上のシステム同定は困難であったが、大域的な収束確率が高い分散型 PSO を用いれば、その倍程度までの次元には適用可能であることが、数値例を通じて確認できた。

（b）量子化出力に基づく元信号の高精度再構成

（b-1）出力の滑らかさを利用した再構成手法：物理的な動的システムの出力は本来滑らかであるので、過去の一連の量子化された出力観測値を、多項式で近似する手法をさらに展開させた。一つは、多項式の次数をスパース性に注目して定めるものである。種々の数値例および基礎実験器により、その有効性を検証した。また一つは、カルマンフィルタとの比較を詳細におこない、特に量子化が粗い場合において提案する出力再構成手法が有効であることを確認した。実験によっても低い解像度の位置センサ情報から高解像度の速度情報が得られることを検証した。

（b-2）計算時間を考慮した実用性検証：上記の手法は多項式の次数を定めるにあたり、凸最適化手法を用いているが、計算負荷が高く現実の装置に実装できるか否かが問題点として浮上した。このため、最適化を含めコード化し、現実的な時間内で最適化計算が実行可能であることを、実験により検証した。

（b-3）オンライン性を考慮した粒子フィル

タの適用：一般の非線形系を対象として，量子化出力から元信号を再構成するために，粒子フィルタの適用を検討した．ここでは，粒子フィルタの計算量が問題となるため，少ない計算量で粒子フィルタを適用できる工夫について検討した．この結果，オンライン性を保持して，粒子フィルタを出力信号再構成に適用できる一つの手法を考案するにいたった．

4.2 課題2

(a) 確率的制御器が有効に働く制御問題の整理

(a-1) ブロードキャスト制御：まず，ブロードキャスト制御問題における確率的制御器の役割の考察を行った．ブロードキャスト制御問題では，制御対象となるエージェント群が，制御入力であるブロードキャスト信号に対して並列構造を有しており，その結果として，制御対象が不可制御（いかなる制御入力値によっても状態変数を任意の値に到達させられない）となっていた．一方，確率的制御器を用いることで，ある制御入力によって，状態変数を任意の値に漸近的に収束させることができる．すなわち，ブロードキャスト制御問題においては，確率的制御器が，不可制御なシステムを疑似的に可制御にする役割があることを明らかにした．

(a-2) 走化性制御：走化性制御においては，自らの絶対座標系での位置（並進位置と回転位置）を知ることはできず，現在の位置の誘引物質の濃度（スカラ情報）だけを用いて，誘引物質の濃度が最も高い地点に到達することができる．つまり，走化性においては，確率的制御器が不十分な観測情報のもとでも精密な位置制御を実現する役割があることを示した．

(a-3) 量子化入力制御：量子化入力制御を実施するにあたり，有効な制御器のひとつとして知られているのがランダムディザ制御器である．これは，連続制御器（制御対象に連続値入力が適用できると仮定した場合に有効に働く制御器），ディザ信号発生器，および一様量子化器で構成され，制御対象への入力がかかなり粗い離散値に制限される場合でも精密な制御の実現ができる [5]．この制御器のメカニズムを考察したところ，量子化器で発生する量子化誤差を確率信号化することで，量子化誤差が制御系に与える影響量を低減していることがわかった．つまり，ランダムディザ制御器は，解像度の低いアクチュエータを疑似的に高解像度化する役割をもつと結論付けた．

(a-4) 確率的制御器が有効に働く制御問題：(a-1)~(a-3)の考察をまとめると，確率的制御器は，センサやアクチュエータの（ある意味での）解像度が低い場合に，それを補う役割（超解像化）を持っていると帰結できる．この結果から，超解像化が必要となる制御問題において，確率的制御器が有

効に働くと示唆される．

(b) 確率的制御器の性能評価指標の開発
走化性制御器を対象に，確率的制御器の性能評価指標の開発を行った．まず，走化性を「誘引物質の濃度が最も高い地点に到達する現象」と定義した．これをもとに，濃度の最も高い地点付近にどれくらい速く到達できるかを表現する「(,)-収束性」という指標を提案した．さらに，濃度の最も高い地点付近に到達した後に，その付近に留まることのできる能力を表現する「r-不変性」という指標も提案した．これらの2つの指標の有効性を確認するために，既存の大腸菌モデルを用いて，いくつかの初期条件に対して解析を行ったところ，走化性制御器の性能を比較的正しく評価できることがわかった．

関連研究：

[5] R. Morita, S. Azuma, and T. Sugie: Performance Analysis of Random Dither Quantizers in Feedback Control Systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 1, pp. 21--27 (2013)

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)

H. Zhu, T. Sugie: Velocity Estimation of Motion Systems Based on Low-Resolution Encoders, 査読有, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 135, No. 1, 2013, pp.0110061-01100618, DOI: 10.1115/1.4007065
杉山暢克, 杉江俊治: 粒子フィルタに基づくマルチモデル推定, 査読有, システム制御情報学会論文誌, Vol. 25 No. 10, 2012, pp. 289-295, DOI:10.5678/iscie.25.289

[学会発表] (計4件)

田淵絢子, ミツバチの蜜源選択を応用したエージェント群の役割分担, 第55回自動制御連合講演会, 2012年11月18日, 京都
T. Sugie, PID Tuning and Identification based on Particle Swarm Optimization, IFAC Workshop on Automation in the Miming, Mineral and Metal Industries, Gifu, Japan, 2012年9月12日
篠原暢宏, ゾウリムシの走化性を司る制御器の性能解析: ゾウリムシと大腸菌, どちらが優れた制御器を持つのか? 第12回制御部門大会, 2012年3月14日,

奈良

T. Sugie, Broadcast Control for
Multi-agent Systems, Robust Control
Workshop 2012, Udine, Italy, 2011年8
月25日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉江 俊治 (SUGIE, Toshiharu)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：80171148

(2) 研究分担者

東 俊一 (AZUMA, Shun-ichi)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

研究者番号：40420400