

平成21年5月15日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17560391
 研究課題名（和文） 時変パラメータに依存したシステムの新しいモデル表現構築と
 その可変制御に関する研究
 研究課題名（英文） Research on new methods of model representation and control
 for time-varying systems
 研究代表者
 小原 敦美（Ohara Atsumi）
 大阪大学・基礎工学研究科・准教授
 研究者番号：90221168

研究成果の概要：自然界や工学応用で現れる様々な非線形な現象やシステムのふるまいの理解と利用は、広い分野に重要な波及効果がある。本研究ではこのような目的のために必要となるモデルの表現や制御の方法に関する研究を主に、そこで必要となるアルゴリズムの創出と評価法の研究を従としておこなった。主な具体的成果は、設計に必要な計算量とモデリングの精度のバランスを考慮できるモデル表現の提案、アルゴリズムの計算複雑度の解析、非線形拡散現象の新しい性質の発見とエントロピーによるその定量的な理解である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	900,000	0	900,000
2006年度	500,000	0	500,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,500,000	330,000	2,830,000

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：システム制御工学，非線形・時変システム，モデリング

1. 研究開始当初の背景

1960年代の状態空間表現による記述に始まる主に時不変線形システムに対する解析・設計技術は、90年代の各種ロバスト制御法の発展を経て、システム制御の分野に関する大きな知見をもたらし、数多くの新しい実応用への道を拓いた。線形時不変システムに対するロバスト制御技術は、理論的には一定の時変・非線形な変動をも取り扱うことが

可能である。しかし、自然界や応用上現れる様々な非線形な現象やシステムは、それをはるかに超えて広範囲かつ複雑であり、システム制御の観点からはさらに一層の幅広く深い研究が待たれていることは、今も当時も変わらない状況である。

研究開始当初はこのようなシステム制御分野の状況に対する一つのアプローチとして次のような構想の可能性と必要性を抱いていた。すなわち、

1) 先に述べた線形時不変システムに対するロバスト制御法の自然な拡張の一つであり、時変でより広い非線形システムを扱うことが可能な「ゲインスケジューリング (以下GS) 制御」を中心あるいはひな形に据え、その方向でのさらなる発展あるいは欠点克服を目指す。

2) 様々な時変・非線形システムのモデリングのサーベイを通して新しいモデル表現法の見直しに取り組み、GS制御だけでなく学習および適応といった仕組みも包含できるような一つの制御系設計法の枠組みを探る。

以上が、本研究着手時の背景と研究動機である。

2. 研究の目的

1の研究開始当初の背景と動機に基づき、研究開始時は次のような目的を設定した。

(1) 研究のスタート方向のひとつとして、具体的にはLPVモデルの構成 (LPVモデリング) 法の構築を設定した。GS制御は、制御対象の動特性に大きく影響する時変パラメータの実時間情報にあわせて制御器を変化させることで、対象の非線形性や大きなパラメータ変動に対処する実際的かつ有効な制御法である。現在の多くのGS制御がLPVシステムというモデル表現をもとにしているが、実応用における様々な状況でLPVモデリングは容易とはいえず実用化は必ずしも活発でない。この問題点を解決するため、本研究の第1の目的は「様々な局面、状況における可変制御のためのモデリング手法の開発」とした。

(2) GS制御を含む可変制御系は従来の固定コントローラの枠を越えて、環境や状況に適應したより進んだ制御系の構築を目指す方法であり、現在はその方向への発展の段階に踏み出したところととらえることができる。これは生体系やニューラルネットワークによる制御あるいは適応・学習制御などが目指す方向と同一である。この際に、安定論・線形ロバスト制御の理論的な結果を中核として、例えばパラメータ推定機構を取り入れたり、制御対象の構造や性質をうまく利用したり種々の現実的な状況に対応可能としてゆくことが有効と考えられる。このようなシステム制御工学の大局的な流れを勘案し、本研究の第2の目的は、「非線形・時変制御対象の様々な情報をうまく活用した可変制御系構築手法の開発」とした。

(3) さらにこれらの2つの目的に加えて、補助的な研究目的として、数理計画の内点法の計算アルゴリズムの工夫や計算複雑度の解析がある。これは第一、二の目的のひな形であるGS制御系の設計問題は、パラメータ依存線形行列不等式と呼ばれる大規模な正定値計画問題の求解に帰着されるために、必要となる計算量の評価とその圧縮が不可避であるためである。

また研究開始の3年目からは次のような研究目的も加えた。

(4) 研究の第一の目的であるモデリング手法の調査中に、多孔媒質方程式と呼ばれる非線形拡散方程式の解の振る舞いと、ボルツマン・シャノンエントロピーをある方向に拡張した量との関係を見出した。したがって、この量に基づく様々な概念の創案と解の性質の探求、特に通常の線形拡散方程式との違いのこの量による特徴付けは数理物理のテーマとしても興味深いので研究目的に加えた。さらにこのような一般化エントロピーの研究に基づいて、自然界のより広いクラスの非線形現象の解析に発展させることも、当研究の目的の自然な延長として視野に含まれることになる。

3. 研究の方法

2で述べた研究目的それぞれに対して、以下のような方向と方法でお互いの有機的な関連を保ちながら、調査研究を進めた。

研究目的(1)に対しては、設計計算とモデリングの手間のバランスをとることが可能なLPVモデリング法の必要性を痛感していた。研究開始の時点で、以下のようなアルゴリズムへのアイデアがあった：

「パラメータの空間変化率の上限が既知という仮定の下で、

- 1) いくつかの離散的な動作点で得られている動特性データから区分的に線形な関数による補間モデルを構成し、
- 2) 最適な制御器の性能解析により次に同定すべき動作点を決定する」

このアルゴリズムを実際に構築し、より現実的な状況 (仮定) への適用性を数値実験などで検証した。

またこの方法は副産物として、非線形システムの軌道制御において軌道上の線形化システムの計算点あるいは同定点の数を減らす効率的なモデリング手法ともなる。この結

果は、ロボットに様々な動作をさせたい場合などに特に有効と考えられるので、この分野への応用も考慮した。

研究目的(2)に対しては、生体システムや適応・推定機構に関する文献の検討しながら、時変パラメータを有する系の制御に関する実際的で有効な方法を検討した。また、特に近年新しい学習制御手法として注目されているハミルトン系の変分対称性を利用した方法の検討やその発展に関しても調査研究を行った。

研究目的(3)に対しては、以前に開発したひとつの計算手法をもとに、計算量と得られる解の精度のバランスをとる尺度を精度保証つき数値計算に基づいて検討した。研究目的(1)の実現には偏微分行列不等式(パラメータ依存行列不等式)の精度の良い解を効率よく求めることが不可避なので、多項式計画と呼ばれる最適化手法など様々な方法やアルゴリズム高速化の適用可能性も調査した。また、計算量の評価も含めて情報幾何学からのアプローチも検討した。

研究目的(4)に対しては、より具体的には(非線形)拡散を示す物理現象に着目した。このような物理現象として、物質・エネルギーの拡散、流動、分布の推移などがある。分野としては(非平衡)統計力学のような非線形動的システム理論の分野以外に、統計学及び学習理論とも関係し、広い範囲の文献に目を配りながら、調査研究を行った。特にそのような現象の(近似的な)モデリングやその性質(例えば平衡点の存在、安定性など)の解析とともに、例えば平衡点の安定化など研究成果からの貢献が可能かどうかに関心を当てながら検討を進めた。

結果を得るための研究活動や成果の検証などは国内企業との共同研究者などとともに適宜実施した。さらに得られた研究成果は、内外の学会・研究会において、共同研究者や指導する学生らを引率の上積極的に参加して公表した。

本研究は、基本的には研究代表者である筆者が単独で行う主に理論的な研究なので、特別の設備費を必要ではなく、主に計算機・ソフトウェアの更新、消耗品関連の購入をおこなった。

また専門的知識や情報を得るための学会活動への参加や資料の収集も積極的に行なった。

以上のような用途のための費用は研究経費に計上し、研究費から執行された。

4. 研究成果

(1) 第一の研究目的に関して、未知制御対象パラメータのスケジューリング変数に対する変化率の上下限のみが既知という仮定の下で、制御対象の不確かさと制御のしやすさ(ロバスト性)を考慮して同定点を決定する手法を開発し、数値例を用いてその有効性を検証し、学会発表⑧で報告した。

さらに計算上の工夫を施すことで、そのアルゴリズムの高速化が可能になり、多数のパラメータがスケジューリング変数とともに変化するような制御対象への実用的な応用が可能であることを示した。またこの方法を非線形システムの軌道制御に応用し、軌道上の線形化システムの計算点あるいは同定点の数を減らす効率的なモデリング手法となることを学会発表⑦で示した。

(2) ハミルトン系の構造活かした学習制御では、変分対称性を満たさないハミルトン系を一般化正準変換により変分対称性を満たすハミルトン系に変換する手法とそれが可能な十分条件を得たので、学会発表①を行い結果を投稿すべく準備中である。

(3) の設計計算の根幹となる内点法の研究では、線形計画、半正定値計画を含む一般的な錐計画問題における計算複雑度が、その許容領域上の中心曲線と呼ばれる特徴的な曲線の曲率積分で陽に表せることを示した。この結果として、アルゴリズムを工夫すれば、現在主流となっているアルゴリズムの計算複雑度をより改善できる可能性のあることが示唆される。この結果は現在投稿中であるが、その主要結果をまとめた解説記事は雑誌論文②に公表した。

(4) では、非線形システムモデリングの基礎研究として、Tsallis エントロピーと呼ばれる量の最大化によるパラメータ推定に関する基本的性質の検討を行ってきた。その成果の一部は雑誌論文③で公表した。

また、このような量を最大化する時間発展を表す非線形拡散方程式である多孔媒質方程式解の不変多様体の存在や収束レートの評価などの振る舞いの性質が明らかにできたので雑誌論文①で発表した。

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5件)

- ① Atsumi Ohara, Geometric Study for the Legendre Duality of Generalized Entropies and Its Application to the Porous Medium Equation, *European Physical Journal B*, Vol. 69, in press (2009) 査読有.
- ② 土谷 隆, 小原 敦美, 内点法と情報幾何, *数学セミナー*, Vol. 47, No. 3/558, 38-43 (2008) 査読無.
- ③ Atsumi Ohara, Geometry of Distributions Associated with Tsallis Statistics and Properties of Relative Entropy Minimization, *Physics Letters A*, Vol. 370, No. 3-4, 184-193 (2007) 査読有.
- ④ 増淵 泉, 小原 敦美, ロバスト行列不等式のシステム制御への応用, *計測と制御*, Vol. 44, No. 8, 561-567 (2005) 査読無.
- ⑤ 小原 敦美, 数理計画法アプローチで新地平を拓く制御理論, *計測と制御*, Vol. 44, No. 8, 515-518 (2005) 査読無.

[学会発表] (計8件)

- ① 高尾, 小原, ハミルトン系の変分対称性条件とその反復学習制御への適用に関する考察, 第51回自動制御連合講演会予稿集, 466-469 (2008) 11月22日 山形大学
- ② Atsumi Ohara and Tatsuki Wada, Geometric Aspects of a Certain Type of Nonlinear Diffusion Equations, Proc. of the Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, 488-491 (2008) Sept. 10 Budapest.
- ③ Atsumi Ohara, Geometric aspects and the Legendre structure of generalized entropies, Int. Conf. in Stat. Phys. 2008, プロシーディングス無し (2008) July 17 Chania.
- ④ 小原, Tsallis相対エントロピーの勾配流について, 電子情報通信学会信学技法NLP2006-07, 25-30 (2006) 7月4日 金沢.
- ⑤ Atsumi Ohara and Shinto Eguchi, Geometry Induced from V-potential Function on Positive Definite Matrices, ILAS Conference, プロシーディングス無し (2006) July 20, Amsterdam.
- ⑥ 小原, 久保田, 吉田, ロバスト安定性を考慮したLPVモデル構成及び同定点設計と非線形系軌道制御への応用, 第6回計測自動制御学会制御部門大会資料, 533-536 (2006) 5

月31日 名古屋.

- ⑦ Atsumi Ohara, Affine Differential Geometric Aspects of Tsallis Statistics, Proc. of the Second Int. Symp. of Information Geometry and its Applications, 51-57 (2005) Dec 12 Tokyo.
- ⑧ 吉田, 久保田, 小原, ロバスト安定性を考慮したLPVモデルの同定計画, 第34回制御理論シンポジウム予稿集, 129-132 (2005) 10月31日大阪.

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

United States Patent 7,008,344
Aikawa, et al. March 7, 2006
Control apparatus for controlling a shift operation in an automatic transmission
Inventors: Aikawa; Akira (Aichi-ken, JP), Kato; Hiroaki (Toyota, JP), Sato; Katsutoshi (Toyoake, JP), Shirai; Yasuo (Chiryu, JP), Ohara; Atsumi (Ibaraki, JP)
Assignee: Aisin Seiki Kabushiki Kaisha (Kariya, JP)
Appl. No.: 10/628,449
Filed: July 29, 2003

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 敦美 (Ohara Atsumi)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 90221168

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし