

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 17 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22560457

研究課題名(和文) 複雑環境下で自立的に調和行動を実現するハイブリッド型適応学習システムの構築

研究課題名(英文) Design of Hybrid Adaptive and Learning Systems Achieving Coordinate Behavior under Complex Environment

研究代表者

宮里 義彦 (Miyasato, Yoshihiko)

統計数理研究所・大学共同利用機関等の部局等・教授

研究者番号：30174155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：現代の適応学習制御システムに対する要請を考慮して、広範囲の環境変動や特性変動、制御仕様の変更に対応でき、特に大規模で複雑な対象について、部分的な情報を用いて、全体を統合化しつつ調和の取れた行動を実現するハイブリッド型適応学習システムの構築を行った。これにより適応学習制御、制御理論、知的制御の従来の枠を拡張するだけでなく、大規模複雑系の調和行動の実現という観点から、既存の分野を越えた新たな研究分野の創成とその理論体系の整備に繋がる成果を得ることが出来た。

研究成果の概要(英文)：This research project constructed design procedures of hybrid adaptive and learning control schemes to achieve coordinate behaviors of large-scaled complex processes by utilizing distributed and local control strategies. By doing so, the research created new research fields in information science and technology, and developed consistent and theoretical methodologies in system and control science from the view point of coordinate control of large-scaled complex processes.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：制御理論 適応制御 非線形制御 ハイブリッド 大規模系 調和行動

### 1. 研究開始当初の背景

制御システムが様々な環境の変化や未知の特性変動に対応するように、適応学習機能を有した制御手法の研究が、これまで国内外の制御理論と知的制御の分野で活発に進められてきた。その中で制御理論の分野では、リアプノフの安定論に基づく適応制御として研究が行われてきたが、モデルの次数やシステム構造に対して決まる特定の制御器の枠内で調整可能なパラメータのみを適応させているために、広範囲の環境変動や特性変動、制御仕様の変更にはもはや対応しきれず、高度の適応学習機能を実現しているとは言えないのが現状である。一方で知的制御の分野では、ニューラルネット、ファジィ推論、遺伝的アルゴリズムや統計的学習理論を用いて、従来の制御理論では取り扱えないような広範囲の環境変動、特性変動、制御目的の変更などに対応できる適応学習システムの構築を目指して、特定の問題によってはある程度まで対処可能な手法もあるが、それらの多くは制御対象の動特性に対する精緻な考察を欠いているため、限定されたケースのみ適用できる事例研究の羅列にとどまっている。しかしこのような不完全な研究の現状にも関わらず、現代の急務の課題として、より広範囲で数々の不確定性のもとで、さらに大規模で複雑な対象について、部分的な情報を用いて全体を統合化しつつ、調和のとれた動作を実現するような適応学習制御手法の開発が必要とされている。

### 2. 研究の目的

本研究ではこのような現代の適応学習制御システムに対する要請を考慮して、広範囲の環境変動や特性変動、制御仕様の変更に対応できて、特に大規模で複雑な対象について、部分的な情報を用いて、全体を統合化しつつ調和の取れた行動を実現するハイブリッド型適応学習システムの構築を目的とする。ここでの対象（大規模複雑系）としては、類似または異なるシステム構造を有する多数の動的システム（制御対象）が相互干渉しながら共存する状況を考えていて、各々の対象について部分的な情報に基づくフィードバック制御を行うことにより、全体として調和の取れた行動（たとえば特定の物体に対する協調動作や群生行動の実現、空間的なパターン

の実現、調和の取れた周期行動の実現など）を実現するような制御の基本原理の開発が研究目的となる。またハイブリッド型適応学習システムとは、制御の要素として、連続時間と離散時間の制御動作の混在、連続事象（時系列上で記述される事象）と離散事象（特定の条件により駆動・生成される離散的な事象）の混在、制御対象のモデルの有限次元の動特性と無限次元の動特性の混在、自由運動（拘束条件がない）と拘束条件下の運動の混在、調和行動に対応する緩やかな拘束とホロノミック拘束と非ホロノミック拘束の混在、軌道の制御と拘束力の制御の混在、条件の切り替わりによるシステムの動特性の切り替わりなどを総合的に含むことを意味していて、これまでの適応学習制御の研究では対処不可能な範疇に属する。このような研究により適応学習制御、制御理論、知的制御の従来の枠を拡張するだけでなく、大規模複雑系の調和行動の実現という観点から、従来の分野を越えた新たな研究分野の創成とその理論体系の整備も視野に含めている。

### 3. 研究の方法

(1) 適応制御、非線形制御、非線形  $H_{\infty}$  制御の研究を進展させて、複数の動的システムから構成される大規模な制御対象を想定して、これの制御にあたって従来のリアプノフ関数に加えて、緩やかな制約条件に対応するポテンシャル関数を追加して考えることで、特定の物体に対して自立的に群生行動（本研究で考える調和行動の一つ、たとえばフォーメーション制御やコンセンサス制御などを含む）を実現するような非線形適応  $H_{\infty}$  制御を提案して、これを時間変化するシステムパラメータを有する対象や、非線形パラメトリックモデル（ニューラルネットなど）を含む非線形系、ロボットマニピュレータ、非ホロノミック系などに適用して、ロバスト特性の優れた適応制御系が実現されることを示してきたが、これらを複数の制御対象の群生行動の実現に拡張することが、本研究全体の最初のステップとなる。

(2) ハイブリッド型適応機構を用いた反復学習制御方式を進展させて、特定の物体に対して自立的に協調動作（本研究の調和行動の一つ、たとえば協調作業による物体の把持など

が含まれる)を実現する反復学習制御手法を開発する。離散時間的に可変パラメータを調整する(ハイブリッド適応則)ためのポテンシャル関数と、緩やかな制約条件(協調動作に対応)を含む制御のためのポテンシャル関数とを、二つ合わせて統合的に安定解析を行う設計論の構築を目指す。またシステムパラメータの推定誤差やポテンシャル関数の変動を外乱と見なした非線形  $H_\infty$  制御方式の構築もこれに関係する。さらに以上の手法を拡張して、ホロノミック拘束と非ホロノミック拘束が存在する場合に、協調動作を実現する反復学習制御方式の開発も行う。

(3) 無限次元系である分布定数系(特に双曲型分布定数系)が複数共存するような大規模系を考えて、これらの対象が特定の物体に対して自立的に群生行動や協調動作を実現する適応制御システムの構築を行う。これは具体的には宇宙空間において柔軟構造物や宇宙機が多数共存して、特定の物体に対して協調作業や群生行動(追従・回避も含む)を取る場合を想定している。分布定数系は無限次元システムであるために、有限次元補償器で安定な制御系を構成するためにはスピルオーバーの問題を解決しなくてはならない。申請者はすでに単体の分布定数系に対して、スピルオーバー項を  $H_\infty$  制御問題における外乱と見なすことで、有限次元補償器で安定性の確保される非線形適応制御方式を開発しているが、これを複数の対象の調和行动の実現に拡張する。さらに以上の成果を発展させて、分布定数系と集中定数系が混在する場合(混合定数系:柔軟ロボットアームが該当する)や、ホロノミック拘束や非ホロノミック拘束が存在する場合に、調和行动を実現する制御手法を構築する。

(4) 様々なハイブリッド特性(先に記述した二つの異なる要素の混在)を有する高度の適応学習システムを構築して、それらの機能を用いて調和行动を実現する基本原理の構築を行う。この中で連続時間と離散時間の制御動作の混在は(2)のハイブリッド型適応機構がその第1ステップとなり、制御対象の有限次元と無限次元の動特性の混在は(3)の研究、拘束関連(ホロノミック拘束、非ホロノミック拘束、拘束力など)は(2)~(3)(場合によっては(1)も含む)の研究がその第1ステップとなる。また連続事象と離散事象の混在は、

ペトリネットや離散事象システム論, max plus 代数による離散システムの記述などが研究の出発点となる。拘束条件の切り替わりによるシステム動特性の切り替わりは、機械システムが外界と接触・離反を繰り返しながら継続する特定の行動(たとえば多リンク機構による移動や歩行、複数のマニピュレータの共同作業による物体の把持と移動など)を想定している。また制御科学と隣接する分野としてシステム生物学やカオス理論にも着目し、それらの分野における空間的パターンの生成や周期行動の実現(特定のリズムの生成)も考慮して、制御科学の成果と合わせることで、新たな大規模複雑系の調和行动の基礎原理の構築を目指す。

#### 4. 研究成果

(1) 大規模系の個々の不確定要素に対する制御手法を発展させる過程で、逆最適化に基づく適応  $H_\infty$  制御の手法を、無限次元系である分布定数系の有限次元制御問題に適用した。特に放物型分布定数系と双曲型分布定数系に対して得られていた結果を混合定数系である弾性アームに拡張し、スピルオーバー項を外乱と見なすことで、有限次元補償器で安定な適応制御系が実現されることを示した。関連する論文が1編の論文として発表された。

(2) 大規模系の個々の不確定要素に対する制御手法を発展させる過程で、入力非線形特性を有する分布定数系の制御問題を考察した。不感帯やバックラッシュなどの入力非線形特性のある系に対して  $H_\infty$  の制御指標に基づく設計法の提案を行い、スピルオーバーの影響も  $H_\infty$  の指標に加えることで、安定性と応答特性の優れた制御系が実現されることを確認した。関連する成果が3編の論文として発表された。

(3) 力学系を構成要素として含む大規模系に対して、緩やかな制約条件と関連づけたポテンシャル関数を追加したりアプノフ関数を用いて、特定の物体に対して自立的に群生行動(フォーメーション制御)を実現する非線形適応  $H_\infty$  制御方式の開発を行った。その際に、システムパラメータや適応機構の不確定性、群生行動に関わるポテンシャル関数の不確定要因を、非線形  $H_\infty$  制御問題の外乱として定式化し、適応制御と非線形制御の理論解析により安定性を確保しつつ、制御システム全体

の性能を厳密に指定できる設計論を開発した。関連する成果が3編の論文として発表された。

(4)モデル規範形適応制御の協調制御への拡張を考えて、線形系を構成要素として含む大規模系に対して、緩やかな制約条件と関連づけたポテンシャル関数を追加したリアプノフ関数を用いて、特定の物体に対して自立的に群生行動（フォーメーション制御）を実現するモデル規範形適応フォーメーション制御方式の開発を行った。その際に、システムパラメータや適応機構の不確定性、群生行動に関わるポテンシャル関数の不確定要因を、非線形  $H_\infty$  制御問題の外乱として定式化し、適応制御と非線形制御の理論解析により安定性を確保しつつ、制御システム全体の性能を厳密に指定できる設計論を開発した。関連する成果が2編の論文として発表された。

(5)回帰方程式で記述される非線形系を個々の要素とする大規模系に対して、要素間の限られた相互情報のみを用いて適応的にコンセンサス制御を実現する手法の研究を行った。システムパラメータや相互情報の不完全な伝達を非線形  $H_\infty$  制御問題の外乱として定式化し、適応制御と非線形制御の理論解析により安定性を確保しながら、制御システム全体の性能を厳密に指定できる設計論を開発した。関連する成果が1編の論文として発表された。

(6)モデル規範形適応制御の協調制御への拡張を考えて、線形系を個々の要素とする大規模系に対して、要素間の限られた相互情報のみを用いて適応的にコンセンサス制御を実現する手法の研究を行った。バックステッピングの手法を適用して、限られた情報でリーダーフォロワー型のモデル規範形適応コンセンサス制御系を設計する手法を開発した。関連する成果が1編の論文として発表された。

(7)無限次元系である分布定数系にフォーメーション制御やコンセンサス制御などの協調制御手法を拡張する研究を行った。緩やかな制約条件と関連づけたポテンシャル関数を追加したリアプノフ関数を用いてポテンシャル関数の不確定要因、要素間の相互情報の不完全な伝達、無限次元系としての高調波モードの影響などを  $H_\infty$  制御問題の外乱として定式化することで、安定性と即応性の確保される無限次元系のフォーメーション制御

方式とコンセンサス制御方式を開発した。関連する成果が3編の論文として発表された。

(8)ハイゲインオブザーバを用いた非線形適応制御系の簡易設計法を協調制御に拡張して、モデル規範形コンセンサス制御の構造の簡単な設計法を開発した。関連する成果が1編の論文として発表された。

(9)大規模系の個々の不確定要素に対する制御手法を発展させる過程で、ハイゲインオブザーバを用いた非線形適応制御系の簡易設計法を、状態のむだ時間遅れや制御器の故障が発生する場合に拡張した。きわめて簡単な制御構造にもかかわらず、耐故障性を有して、むだ時間遅れにも対処可能なロバスト適応制御の構成法を開発した。関連する成果が3編の論文として発表された。

#### 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 18 件)

① Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Formation Control for Distributed Parameter Systems of Hyperbolic Type by Finite Dimensional Controllers, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 7, 2014, 82-89.

② Yoshihiko Miyasato, Model Reference Adaptive Consensus Control, Proceedings of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2013, 6232-6237.

③ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control for Distributed Parameter Systems of Hyperbolic Type, Proceedings of 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 査読有, 2013, 1018-1023.

④ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Formation Control for Infinite-Dimensional Systems, Proceedings of 51st IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2012, 6071-6076.

⑤ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Formation Control for a Swarm of Mobile Robots, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 5, 2012, 359-365.

⑥ 宮里義彦, 非線形入力特性を有する双曲型分布定数系の有限次元モデル規範形適応 $H_\infty$ 制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 48, 2012, 78-85.

⑦ Yoshihiko Miyasato, A Design Method of Model Reference Adaptive Formation Control, Proceedings of IFAC 18th World Congress, 査読有, 2011, 1198-1203.

⑧ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Formation Control for Euler-Lagrange Systems, by Utilizing Neural Network Approximators, Proceedings of 2011 American Control Conference, 査読有, 2011, 1753-1758.

⑨ 宮里義彦, ある種の混合定数系の有限次元モデル規範形適応 $H_\infty$ 制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 47, 2011, 43-50.

⑩ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Formation Control for Euler-Lagrange Systems, Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2010, 2614-2619.

⑪ Yoshihiko Miyasato, Finite Dimensional Adaptive  $H_\infty$  Control for Flexible Arms Preceded by Input Nonlinearities, Proceedings of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 査読有, 2010, 2296-2301.

⑫ Yoshihiko Miyasato, Finite Dimensional Adaptive  $H_\infty$  Control for Distributed Parameter Systems of Hyperbolic Type Preceded by Input Nonlinearity, Proceedings of 2010 American Control Conference, 査読有, 2010, 2581-2586.

[学会発表] (計 26 件)

① 宮里義彦, モデル規範形適応 $H_\infty$ コンセンサス制御, 計測自動制御学会・第1回制御部門マルチシンポジウム(招待講演), 2014.

② 宮里義彦, TC1. 2 Adaptive and Learning Systems の活動報告と最近の動向 (IFAC Technical Committee の報告), 第56回自動制御連合講演会(招待講演), 2013.

③ Yoshihiko Miyasato, A Simple Redesign of Model Reference Adaptive Consensus Control, SICE Annual Conference 2013 (招待講演), 2013.

④ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Control Consensus Control of Multi-Agent Systems, ALCOSP 2013 and PSYCO 2013, 2013.

⑤ 宮里義彦, 適応制御の黎明期と近年の話題 (フォーメーション制御), 計測自動制御学会・第13回制御部門大会(招待講演), 2013.

⑥ Yoshihiko Miyasato, A Simple Redesign of Model Reference Adaptive Control for State-Delayed Systems with Actuator Failures, SICE Annual Conference 2012 (招待講演), 2012.

⑦ Yoshihiko Miyasato, Model Reference Adaptive Formation Control based on  $H_\infty$  Control Criterion, 20th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 2012.

⑧ 宮里義彦, 無限次元システムの適応 $H_\infty$ フォーメーション制御, 計測自動制御学会・第12回制御部門大会(招待講演), 2012.

⑨ Yoshihiko Miyasato, A Simple Redesign of Model Reference Adaptive Control with Actuator Failures, SICE Annual Conference 2011 (招待講演), 2011.

⑩ 宮里義彦, 非線形パラメトリックモデルを用いたEuler-Lagrangeシステムの適応 $H_\infty$ フォーメーション制御, 計測自動制御学会・第11回制御部門大会, 2011.

⑪ 宮里義彦, モデル規範形適応フォーメーション制御, 計測自動制御学会・第39回制御理論シンポジウム(招待講演), 2010.

⑫ Yoshihiko Miyasato, A Simple Redesign of Model Reference Adaptive Control for State-Delayed Systems with General Relative Degrees, SICE Annual Conference 2010 (招待講演), 2010.

[図書] (計 2 件)

① 宮里義彦, 電気工学ハンドブック, 担当部分: 1編 数学 5章 直交関数, 電気学会・オーム社, 2013, 15-19.

② 宮里義彦, 電気学会125年史, 担当部分: 9編 制御技術 2章 モデルベース制御 3節 適応制御, 電気学会, 2013, 533-535.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮里 義彦 (MIYASATO YOSHIHIKO)

統計数理研究所・数理・推論研究系・教授  
研究者番号: 30174155