

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420433

研究課題名(和文) 通信制約のある複雑環境下で協調行動を自動生成する分散型適応学習システムの構築

研究課題名(英文) Design of Distributed Adaptive and Learning Systems with Auto-Generation of Cooperation Behaviors under Complicated Circumstances of Restricted Communications

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

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)：適応学習制御方式への要請を考慮して、広範囲の環境変動や特性変動および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、構成要素間相互の通信制約を考慮しながら部分的な情報を用いて、システム全体を統合化し調和の取れた行動原理を自動生成する適応学習手法の開発を行った。これにより適応学習制御、制御理論、知的制御のこれまでの枠組みを拡張するだけでなく、通信制約を考慮した大規模複雑系の協調行動の自動生成という観点から、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 decentralized adaptive and learning systems to achieve cooperation behaviors of large-scaled complex processes by utilizing distributed and local control strategies under complicated circumstances of restricted communications. By doing so, the project 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 multi-agent systems via restricted information structures among unknown agents.

研究分野：電気電子工学

キーワード：制御理論 適応制御 非線形制御 分散制御 マルチエージェント系 協調行動

## 1. 研究開始当初の背景

人間と機械の調和を目的とする自動制御の最終目標は、制御系の自動設計と自動調整機能を有する適応制御とされている。この目標を達成するために適応学習機能を有した制御手法の研究が、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。特に制御理論の分野では、安定論に基づく適応制御を中心として研究が行われてきたが、対象や制御器のシステム構造をあらかじめ規定した範囲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および制御仕様には対応しきれず、高度の適応学習機能を実現していない。一方で知的制御の分野では、ニューロ・ファジィ推論、遺伝的アルゴリズムや機械学習理論を用いて、従来の制御理論では取り扱えない広範囲の環境変動や特性変動、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が検討されているが、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に、限定された場合にのみ適用できる事例研究にとどまっている。しかしこのような不完全な研究の現状にも関わらず、急務の課題として、広範囲で種々の不確定性のもとで、大規模で複雑な対象について、部分的な情報を用いてシステム全体を統合化しつつ、調和のとれた制御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適応学習制御方式への要請を考慮して、広範囲の環境変動や特性変動および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、構成要素間相互の通信制約を考慮しながら部分的な情報を用いて、システム全体を統合化し調和の取れた行動原理を自動生成する適応学習手法を開発する。ここにおける対象（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が相互干渉しながら共存する状況（多体系）を考えていて、相互に通信制約がある場合に部分的な情報に基づくフィードバック制御により、システム全体として調和の取れた行動（群生行動の実現、合意形成、空間的なパターンの生成、周期行動の発現、特定の物体に対する協調動作など）を実現する制御の基本原理の構築が研究目的となる。またここで考える適応学習制御手法とは、特に各要素間の通信に制約がある場合を想定して、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、モデルの有限次元の動特性と無限次元の動特性の混在、自由運動と拘束条件下の運動の混在、協調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、分散情報を考慮した合意形成制御などを総合的

に含んでいて、旧来の適応学習制御の研究では一括した対処が不可能な範疇に属する。これにより適応学習制御、制御理論、知的制御のこれまでの枠組みを拡張するだけでなく、通信制約を考慮した大規模複雑系の協調行動の自動生成という観点から、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  $H_{\infty}$  制御の研究を発展させて、複数の動的システムから構成される大規模な制御対象に対して、安定解析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、あるいは相互の通信制約を考えることで、特定の物体に対して自立的に群生行動や合意形成制御（本研究の協調行動）を実現するような非線形適応  $H_{\infty}$  制御方式の構築を行う。申請者はすでに非線形適応  $H_{\infty}$  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、ロボット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協調行動の実現に拡張することが、本研究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発展させて、特定の物体に対して自立的に協調動作や通信制約を考慮した合意形成制御（調和行動、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、あるいは通信制約を組み合わせた定式化も含めて統合的な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、情報の不完全な伝達など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および合意形成制御を実現する適応制御システムの構築を行う。これ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同期・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ので、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、スピルオーバー問題を  $H_{\infty}$  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協調行動の実現に拡張する。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など）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、協調行動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（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協調行動を実現するための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(1)～(3)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。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、数理生物学・物理学の反応拡散系にも着目し、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、制御科学で得られた知見と合わせることで、新たな大規模複雑系の協調行動の基礎原理の構築を目指す。

#### 4. 研究成果

(1) 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無向グラフ上のコンセンサス制御を実現する手法の研究を行った。具体的には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。特にシステムパラメータの不確定性を、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としてまとめた。関連する成果が1編の論文として発表された。

(2) 無限次元系である分布定数系に協調制御手法としてのコンセンサス制御を拡張する研究を行った。エージェント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、安定性及び応答性の確保される無限次元系の無向グラフ上のコンセンサス制御方式を開発した。放物型と双曲型の2種類の分布定数系に対する関連する成果が2編の論文として発表された。

(3) 回帰方程式で記述される線形系と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

応的に無向グラフ上の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。線形系に対する基本的な設計法、目標信号の生成モデルを利用した漸近追従性を達成する手法への改良、入力非線形性が存在する場合への手法の拡張、内部にむだ時間要素が含まれる場合への対応、未知構造の非線形成分を含む場合のニューラルネットワークを併用する手法など、様々なケースを想定した設計法を開発し、関連する成果が6編の論文として発表された。

(4) 回帰方程式で記述される線形系と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有向グラフ上のコンセンサス制御を実現する手法の研究を行った。限られた情報から目標信号（リーダー）を推定し、システムパラメータの不確定性を非線形  $H_\infty$  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。線形系に対する基本的な設計法と未知構造の非線形成分を含む場合のニューラルネットワークを併用する手法など、様々なケースを想定した設計法を開発し、関連する成果が3編の論文として発表された。

(5) ロボットマニピュレータモデルの一般化表現である非線形機械系（Euler-Lagrange系）に対して有向グラフ上のコンセンサス制御を拡張する研究を行った。通常 Euler-Lagrange 系の構成法と、未知構造の非線形成分を含む場合のニューラルネットワークを併用する手法を開発して、関連する成果が3編の論文として発表された。

(6) 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、モデル規範形フォーメーション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。

(7) 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するこれまでの自身の研究の流れ、およびそれを協調制御としてのフィーメーション制御と無向グラフ上のコンセンサス制御に拡張する一連の研究を、2編の解説論文として取りまとめた。

#### 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, Inverse Optimal Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Multi-Agent Systems on Directed Network Graphs, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 11, 2018, 113-121.
  - ② Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Euler-Lagrange Systems on Directed Network Graph by Utilizing Neural Network Approximators, Proceedings of IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2017), 査読有, 2017, 1656-1662.
  - ③ 宮里義彦, 無限次元系の協調制御, 計測と制御, 査読有, 56, 2017, 925-930.
  - ④ Yoshihiko Miyasato, Inverse Optimal and Asymptotically Stable Adaptive Consensus Control of Multi-Agent Systems Based on  $H_\infty$  Control Criterion, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 10, 2017, 016-024.
  - ⑤ Yoshihiko Miyasato, Comparative Study of Adaptive Consensus Control of Euler-Lagrange Systems on Directed Network Graph, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTES), 査読有, 2, 2017, 1165-1171.
  - ⑥ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Multi-Agent Systems on Directed Graph by Utilizing Neural Network Approximators, Proceedings of 12th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSIP 2016), 査読有, 2016.
  - ⑦ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Multi-Agent Systems on Directed Graph, Proceedings of 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2015), 査読有, 2015, 7592-7597.
  - ⑧ Yoshihiko Miyasato, Inverse Optimal Adaptive Consensus Control of Multi-Agent Systems Based on  $H_\infty$  Control Criterion, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 8, 2015, 341-347.
  - ⑨ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Multi-Agent Systems Preceded by Input Nonlinearities, Proceedings of the 2015 IEEE Control Systems Society; Multi-Conference on Systems and Control (MSC 2015), 査読有, 2015, 670-675.
  - ⑩ 宮里義彦, 分布定数系の適応制御, システム/制御/情報, 査読有, 58, 2014, 365-370.
  - ⑪ Yoshihiko Miyasato, Finite-Dimensional Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control for Infinite-Dimensional Systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 7, 2014, 255-262.
  - ⑫ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control for Distributed Parameter Systems of Parabolic Type, Preprints of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 査読有, 2014, 4158-4163.
  - ⑬ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Multi-Agent Systems by Utilizing Neural Network Approximators, Preprints of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 査読有, 2014, 4152-4157.
  - ⑭ Yoshihiko Miyasato, Model Reference Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control, Proceedings of 2014 American Control Conference, 査読有, 2014, 2371-2376.
- [学会発表] (計 23 件)
- ① 宮里義彦, 無限次元系の適応コンセンサス制御～有向グラフの場合～, 第 60 回自動制御連合講演会 (招待講演), 2017.
  - ② 宮里義彦, 漸近安定性を達成するマルチエージェント系の適応  $H_\infty$  コンセンサス制御～第 2 報～, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会 (招待講演), 2017.
  - ③ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Euler-Lagrange Systems on Directed Network Graph, IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2016), 2016.
  - ④ 宮里義彦, 非線形パラメトリックモデルを用いたマルチエージェント系の適応  $H_\infty$  コンセンサス制御～有向グラフの場合～, 第 59 回自動制御連合講演会 (招待講演), 2016.
  - ⑤ 宮里義彦, 放物型分布定数系の有限次元適応  $H_\infty$  コンセンサス制御, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会 (招待講演), 2016.
  - ⑥ 宮里義彦, 漸近安定性を達成するマルチエージェント系の適応  $H_\infty$  コンセンサス制御～有向グラフの場合～, 計測自動制御学会制御部門第 3 回マルチシンポジウム, 2016.
  - ⑦ 宮里義彦, 非線形入力特性を有するマル

チエージェント系の適応  $H_\infty$  コンセンサス制御, 第 58 回自動制御連合講演会 (招待講演), 2015.

- ⑧ Yoshihiko Miyasato, Adaptive  $H_\infty$  Consensus Control of Multi-Agent Systems with Time Delays, SICE Annual Conference 2015 (招待講演), 2015.
- ⑨ Yoshihiko Miyasato, Asymptotically Stable Adaptive Consensus Control of Multi-Agent Systems Based on  $H_\infty$  Control Criterion, 10th Asian Control Conference (ASCC 2015) (招待講演), 2015.
- ⑩ 宮里義彦, 漸近安定性を達成するマルチエージェント系の適応  $H_\infty$  コンセンサス制御, 第 57 回自動制御連合講演会 (招待講演), 2014.
- ⑪ Yoshihiko Miyasato, A Simple Redesign of Model Reference Formation Control, SICE Annual Conference 2014 (招待講演), 2014.

[図書] (計 1 件)

- ① 宮里義彦, 適応制御, コロナ社, 2019 (単著).

## 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: 3 0 1 7 4 1 5 5