

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04221

研究課題名（和文）ネットワーク環境下で異なる構造を有する複雑大規模系の創発を含む適応型協調制御方式

研究課題名（英文）Design of Adaptive Cooperative Control of Large-Scaled Complex Processes of Different Structures under Restricted Network Communications including Emergence

研究代表者

宮里 義彦（Miyasato, Yoshihiko）

統計数理研究所・運営企画本部・特任教授

研究者番号：30174155

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000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、異なる構造を有する部分システムから構成される複雑大規模系に対して、ネットワーク環境下における通信の様々な制約を考慮しつつ、全体的あるいは部分的な情報のフィードバックで全システムを統合化し協調的な動作を実現する適応型協調制御方式の開発を行った。これにより制御理論、適応学習制御、知的制御、知識科学の従来の枠組みを拡張するだけでなく、大規模で複雑な混合システムの創発を含む協調制御の実現という観点から、関連分野を統合する新たな研究領域の創成とその理論体系・基礎原理の整備に繋がる成果を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究の遂行により制御理論、適応学習制御、知的制御、知識科学の従来の枠組みを拡張するだけでなく、大規模で複雑な混合システムの創発を含む協調制御の実現という観点から、関連分野を統合する新たな研究領域の創成とその理論体系・基礎原理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 of different structures 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 including emergence.

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

様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

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、異なる構造を有する部分システムから構成される複雑大規模系に対して、ネットワーク環境下における通信の様々な制約を考慮しつつ、全体的あるいは部分的な情報のフィードバックで全システムを統合化し協調的な動作を実現する適応型協調制御方式の開発を行う。特にあらかじめ設定された制御目的と各部分システムの役割分担に固執せず、適宜、全体の目的達成のために個々の役割分担をも適応的に再調整する機能を有する(創発を含む)高次の適応型システムの構築を考えている。この研究の遂行により制御理論、適応学習制御、知的制御、知識科学の従来の枠組みを拡張するだけでなく、大規模で複雑な混合システムの創発を含む協調制御の実現という観点から、関連分野を統合する新たな研究領域の創成とその理論体系・基礎原理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 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、リアプノフ関数と制約条件に対応するポテンシャル関数、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 制御方式の構築を行う。申請者はすでに非線形適応 H 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、ロボаст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協調行動の実現に拡張し双方向あるいは片方向の通信環境に拡張することが、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、協調作業としての物体の把持なども含む)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含め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 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 / 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パ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、スパルオーバー項を H 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進展させて、通信環境が相互通信と片方向通信の場合、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、協調動作を実現する制御手法を構築する。

(4) 構造の異なる動的システム(線形と非線形,有限次元と無限次元,連続時間と離散時間)に対する合意形成制御の手法を構築して、それらの機能を用いて協調動作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, maxplus 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。

(5) 制御目的の再設定や協調動作のための役割分担の適応的な再調整機能を含む創発を含む協調制御原理の構築へと研究領域を広げていく。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動作の基礎原理の構築を目指す。

4. 研究成果

(1) 力学系を構成要素として含む大規模系(多体系)に対して,ネットワークグラフを用いて表される相互の通信制約を考慮して,特定の物体に対して自立的に合意形成制御を実現する非線形適応 H 制御方式の構築を行った。システムの特長や適応機構の不確定性,および相互情報の不完全な伝達などを,非線形 H 制御問題の外乱として定式化し,適応制御と非線形制御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の開発を行った。

(2) 有向グラフ上の合意形成制御において,追従すべきリーダの信号の情報をその生成モデルから取得し,非線形 H 制御問題としての定式化と適応制御と非線形制御による安定化を並列させることで,漸近的にコンセンサス追従が達成される設計論を開発し,その結果を発表した。さらに有向グラフ上で無限次元の振動モードが存在する双曲型分布定数系の有限次元合意形成制御方式を開発し,成果としてまとめた。

(3) 有向グラフ上の合意形成制御において,入力に未知の非線形特性(不感帯やヒステリシス特性)が存在するときに,非線形特性の未知パラメータを適応的に同定し,非線形 H 制御問題としての定式化と適応制御と非線形制御による安定化を並列させることで,近似的にコンセンサス追従が達成される設計論を開発し,その結果を発表して成果としてまとめた。

(4) 機械系などの Euler-Lagrange システムに対する無向グラフおよび有向グラフ上の合意形成制御において、追従すべきリーダーの信号の情報をその生成モデルから取得し、非線形 H_∞ 制御問題としての定式化と適応制御と非線形制御による安定化を並列させることで、漸近的にコンセンサス追従が達成される設計論を開発し、その結果を発表した。さらに有向グラフ上で無限次元のスペクトルが存在する放物型分布定数系の有限次元合意形成制御方式を開発し、成果としてまとめた。

(5) 内部モデル原理に基づくサーボ制御方式の適用と、強正実有理関数の相対次数の自由度に着目することで、次数に依存せずまた相対次数の不確定性にも対処可能な適応型協調制御方式が実現できる見通しが得られ、将来的にこの制御系の精緻な構成方法を開発する手がかりとなった。これらの制御方式の原型については、所属学会の研究会における特別講演でこれまでの研究成果の振り返りとして発表した。

(6) 通信制約が無向グラフあるいは有向グラフで表される場合の適応機構に与える大きな差異に着目し、内部モデル原理に基づく適応サーボ方式と強正実有理関数の相対次数の自由度を考慮して制御システム設計を全体的に見直すことで、次数や相対次数の不確定性およびパラメトリックと非パラメトリックな不確定性に対応できる非線形 H_∞ 制御型の適応協調制御方式の設計理論を構築する見通しを得ることが出来た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshihiko Miyasato	4. 巻 54
2. 論文標題 Adaptive H Consensus Control for Distributed Parameter Systems of Parabolic Type on Directed Network Graph	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC Paper On Line	6. 最初と最後の頁 341-346
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2021.06.092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tsutsui Yoshiyuki, Miyasato Yoshihiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Local Stabilization of Navier-Stokes systems via Observer-Based Feedback	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2020	6. 最初と最後の頁 721-726
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SICE48898.2020.9240339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宮里義彦	4. 巻 59
2. 論文標題 統計解析とモデリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 665-670
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiyasu Tsutsui, Yoshihiko Miyasato	4. 巻 -
2. 論文標題 Observer-based Feedback Stabilization of Distributed Parameter Systems of Parabolic Type with Non-Self-Adjoint Operators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 Asian Control Conference (IEEE Xplore Digital Library)	6. 最初と最後の頁 746/749
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiko Miyasato	4. 巻 -
2. 論文標題 Adaptive H Consensus Control of Multi-Agent Systems with Input Nonlinearity on Directed Network Graph	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IFAC Workshop ALCOS 2019 (IFAC-PaperOnline)	6. 最初と最後の頁 61/66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2019.12.622	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiko Miyasato	4. 巻 -
2. 論文標題 Finite Dimensional Adaptive H Control of Distributed Parameters Systems with Additive Nonlinear Terms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2019	6. 最初と最後の頁 587/592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiko Miyasato	4. 巻 -
2. 論文標題 Asymptotically Stable Adaptive H Consensus Tracking Control of Multi-Agent Systems on Directed Graph	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the IASTED International Conference Intelligent Systems and Control (ISC 2018)	6. 最初と最後の頁 97 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2316/P.2018.858-012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiko Miyasato	4. 巻 51
2. 論文標題 Adaptive H Consensus Control for Distributed Parameter Systems of Hyperbolic Type on Directed Graph	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IFAC-PaperOnLine (Proceedings of 7th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys 2018))	6. 最初と最後の頁 307 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2018.12.053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiko Miyasato	4. 巻 -
2. 論文標題 Simple Design of Model Reference Adaptive Consensus Control on Directed Network Graph	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 208 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 宮里義彦
2. 発表標題 Passivityと正実性に捕らわれて(Captured by Passivity and Positive Realness)
3. 学会等名 計測自動制御学会 制御部門 データ駆動型社会を支える適応学習制御調査研究会 第3回講義会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮里義彦
2. 発表標題 Euler-Lagrangeシステムの漸近安定な適応H コンセンサス制御 -無向グラフの場合-
3. 学会等名 計測自動制御学会制御部門第8回マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiyasu Tsutsui, Yoshihiko Miyasato
2. 発表標題 Observer-based Feedback Stabilization of Distributed Parameter Systems of Parabolic Type with Non-Self-Adjoint Operators
3. 学会等名 2019 Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiko Miyasato
2. 発表標題 Finite Dimensional Adaptive H Control of Distributed Parameters Systems with Additive Nonlinear Terms
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮里義彦
2. 発表標題 放物型分布定数系の有限次元適応H コンセンサス制御 ~有向グラフの場合~
3. 学会等名 自動制御連合講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiko Miyasato
2. 発表標題 Adaptive H Consensus Control of Multi-Agent Systems with Input Nonlinearity on Directed Network Graph
3. 学会等名 IFAC Workshop ALCOS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮里義彦
2. 発表標題 Euler-Lagrangeシステムの漸近安定な適応H コンセンサス制御 ~有向グラフの場合~
3. 学会等名 計測自動制御学会制御部門第7回マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮里義彦
2. 発表標題 むだ時間遅れを有するマルチエージェント系の適応H コンセンサス制御～有向グラフの場合～
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 筒井良行, 宮里義彦
2. 発表標題 非自己共役作用素をもつ放物型分布定数系のオブザーバ併合フィードバック安定化
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮里義彦
2. 発表標題 非線形入力特性を有するマルチエージェント系適応H コンセンサス制御～有向グラフの場合～
3. 学会等名 計測自動制御学会制御部門第6回マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiko Miyasato
2. 発表標題 Asymptotically Stable Adaptive H Consensus Tracking Control of Multi-Agent Systems on Directed Graph
3. 学会等名 IASTED International Conference Intelligent Systems and Control (ISC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiko Miyasato
2. 発表標題 Adaptive H Consensus Control for Distributed Parameter Systems of Hyperbolic Type on Directed Graph
3. 学会等名 The 7th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiko Miyasato
2. 発表標題 Simple Design of Model Reference Adaptive Consensus Control on Directed Network Graph
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関