

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560544

研究課題名(和文)大規模ネットワーク動的システムのロバスト分散協調制御

研究課題名(英文)Robust distributed cooperative control of large-scale networked dynamical systems

研究代表者

鷹羽 浄嗣 (Takaba, Kiyotsugu)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30236343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ネットワーク上に散在する複数のエージェントの局所的な相互作用により、系全体として同期やフォーメーション等の協調的なタスクを達成するシステムをネットワーク動的システムという。本研究課題では、エージェントモデルのゲイン有界な不確かさ及びネットワーク構造の確率的変動の下で、ネットワーク動的システムのロバスト性解析を行い、ロバストに同期を達成するための十分条件を導出した。また、これらの解析に基づき、上述の不確かさ・変動に対してロバストに同期を達成する分散協調制御系の設計法を提案した。以上の研究成果は、大規模ネットワーク上のロバスト分散協調制御システムの構築のための理論的基盤の一翼を担うものである。

研究成果の概要(英文)：A networked dynamical system consists of a number of agents located widely over a network, and aims at achieving a collective task, such as synchronization and formation, through local interactions among neighboring agents. In this research, we have derived sufficient conditions for synchronizing the networked dynamical systems in the presence of gain-bounded uncertainties in the agent models and/or the stochastic switching of the network topologies. Based on these robustness analyses, we have also proposed design methods of distributed cooperative controllers which robustly synchronize the networked dynamical systems against the aforementioned model uncertainties and/or switching network structures. The results obtained in this research will play an important part of the theoretical foundation for robust distributed cooperative control design of large-scale networked dynamical systems.

研究分野：制御理論

キーワード：大規模ネットワーク動的システム マルチエージェントシステム 分散協調制御 ロバスト性

1. 研究開始当初の背景

複数のエージェントがネットワーク上に散在し、近接するエージェントとの局所的な情報交換に基づいて各エージェントが分散的に制御することにより、同期・フォーメーション等の協調的なタスクを実行するシステムをネットワーク動的システムまたはマルチエージェントシステムという。

ネットワーク動的システムの応用分野は、物理学、生物学、センサネットワーク、移動体の編隊制御、分散コンピューティングなど多岐に渡っており、そのための制御理論の構築が期待されている。

本研究課題では、大規模ネットワーク動的システムにおいてモデル不確かさの下でもロバストに協調的タスクを達成するための条件を明らかにし、ロバストなネットワーク制御システムの設計法について研究する。ここで、ネットワーク動的システムにおけるモデル不確かさとしては、以下の2種類がある。

- (1) エージェント動特性の変動, モデル化誤差
- (2) ネットワーク構造(トポロジー)の変動

(1)の例として、編隊制御における移動体の質量(燃料消費に応じて変動)、センサネットワークで各センサのクロック周期のズレなどがある。これらを補償した制御則を適用しなければ、所望の協調的タスクは達成できない。一方、(2)に関しては、移動体・センサノードの移動によるセンサー範囲の変化、通信ネットワークでのパケットロスなどがネットワーク構造変化の要因である。(1)の場合に対する先行研究として、原ら(東大)、Jonssonら(スウェーデン)の線形時不変エージェントに対する研究がある。(2)に関連する研究としては、ネットワーク構造が確定的に変化する場合(Fax, Saber & Murray; Xiao & Boyd; Jadbabaie ら)および確率的に変化する場合(Hatano & Mesbahi, Fagnani & Zampieri)の双方に関していくつかの研究が報告されている。ただし、本研究課題開始当初は、申請者の知る限り、(1),(2)を同時に扱った研究は未だ報告されていなかった。

以上の背景の下で、本研究課題では、大規模なネットワーク動的システムに対して(1) エージェント動特性の不確かさ、及び (2) ネットワーク構造の時間変化の両方が存在する下で、ロバストに協調的タスクを達成するための条件を導き、それに基づいたシステム設計法を検討する。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、大規模ネットワーク動的システムにおいて、各エージェントのモデル不確かさおよびネットワーク構造の変動の下で、システムのロバスト性を解析することにより、ネットワーク構造とロバスト性・制御性能との関係を解明し、さらに、大規模複雑ネットワーク上にロバスト分散協調制御系を構築するための理論的基盤を提案することである。

3. 研究の方法

まず、先行研究の調査を行ない、エージェント動特性の均一性・受動性、およびネットワークのグラフ構造(トポロジーの時変性、通信の方向性など)に着目して、問題点を整理した。

次に、不確かさを有するネットワーク動的システムのモデリングについて検討した。本研究課題では、ノミナルのエージェントモデルとして、受動的な非線形システムまたは高次の干渉時不変システムを想定し、モデル不確かさとしては、ゲイン有界な加法的な不確かさ又はセクター有界な入力端非線形性を仮定した。また、ネットワーク構造の変動としては、独立同一分布による確率的変動について検討することとした。

このようにして設定したシステムモデルに対して、ロバスト制御理論などを援用した理論的検討を通じて、同期条件の導出および同期を達成するフィードバック則・プロトコルの設計法の構築を行った。

提案した同期条件・設計法の有用性は、数値解析ソフト MATLAB/Simulink 上での数値計算・シミュレーションによって検証を行った。また、フォーメーション制御については、小型移動ロボット e-puck を用いて検証実験も行った。これらのソフトウェア、実験機器は、主に本研究課題の予算で購入したものであり、現有設備の一部も本研究に使用した。

4. 研究成果

(1) 非線形ネットワーク動的システムのロバスト同期制御

有向グラフで定義されるネットワーク上の非線形ネットワーク動的システムにおいて、エージェントのノミナル動特性が受動的であるという仮定の下で、エージェントモデルのゲイン有界な加法的変動に対してロバストな同期制御を達成するための条件を導出した(論文[5])。

(2) 不確かさを有する線形ネットワーク動的システムのロバスト同期条件

加法的モデル誤差を有する線形エージェントからなるネットワーク動的システムに対して、オブザーバ型分散制御器により各エージェントの状態同期をロバストに達成するための必要十分条件を導出し、許容可能なモデル誤差の限界を評価した。(論文[3], 学会発表[9])

(3) 確率的に変動するネットワーク上での非線形エージェント群の同期制御

・受動的な離散時間非線形エージェントからなるネットワーク動的システムに対して、ネットワーク構造が確率的に変動する状況下での同期制御を検討し、同期を達成する相対出力フィードバック則が存在するための十分条件を、通信ネットワークのラプラシアン期待値を用いて導出した(学会発表[8])。

- ・同期を達成するフィードバック則を得るにはラプラシアン期待値が事前情報として必要であるが、その期待値がポリトープ型不確かさを含む場合でも同期フィードバック則を設計できる条件を検討した(学会発表[6])。
- ・さらに、ネットワーク構造が確率的に変動し、かつ、エージェントモデルが加法的不確かさを有する状況の下で、ロバストに同期を達成するための十分条件を導出した(学会発表[2])

(4)入力端に非線形性をもつ線形エージェント群の同期制御

- ・双方向のエージェント間通信が可能なネットワーク(無向グラフ)上で、入力端に飽和などの非線形性を有する線形エージェント群の同期制御を検討した。非線形性をセクター有界な不確かさと見なすことにより、線形号列不等式による同期条件(十分条件)を導出した。さらにこの解析条件を用いて、同期を達成する相対状態フィードバック則および動的出力フィードバック則の設計条件を導いた。非線形性が飽和要素である場合の結果については、論文[2]と学会発表[1],[4]で発表した。任意のセクター有界な非線形性に対する結果は、現在論文投稿中である。
- ・また、入力端非線形要素が飽和要素の場合において、上記の同期条件を大規模複雑ネットワークモデルの一つであるスモールワールドネットワークにこの同期条件を適用し、ネットワーク密度と同期可能性との関係を数値的に検討した(論文投稿中)。

(5)領域極配置手法に基づく非線形ネットワーク動的システムの同期

受動的とは限らない非線形エージェントからなるネットワーク動的システムにおいては、ネットワークの重み付きラプラシアンの固有値を適切な領域内に配置することによって同期が達成されることが知られている。制御理論における領域極配置の手法を援用することにより、同期を達成するようなエージェント間結合重み(分散フィードバックゲイン)の設計法を提案した(論文[4],学会発表[7])。

(6)障害物回避を考慮した移動ロボット群のフォーメーション制御

ネットワーク動的システムの分散協調制御を援用して、障害物回避を考慮したリーダーレスフォーメーション制御手法を提案した。数値シミュレーション及び小型移動ロボット群を用いた実験でその有用性を検証した(論文[1],学会発表[3])。

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] 宮崎達也, 鷹羽浄嗣: “障害物回避を考慮した移動ロボット群のフォーメーション制御,” システム制御情報学会論文誌, vol.28, no.2, pp.50-57, 2015. 査読有
DOI: 10.5687/iscie.28.50
- [2] K. Takaba: "Synchronization of linear multi-agent systems under input saturation," *Proceedings of 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS2014)*, pp. 1976-1979, 2014. 査読有
<http://fwn06.housing.rug.nl/mtns2014-papers/fullPapers/0139.pdf>
- [3] H.L. Trentelman, K. Takaba, and N. Monshizadeh: "Robust synchronization of linear uncertain multi-agent systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, pp. 1511-1523, 2013. 査読有
DOI: 10.1109/TAC.2013.2239011
- [4] K. Takaba and A.Hibi: "Synchronization of coupled nonlinear oscillators via regional pole placement technique," *Proceedings of 51st IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3928-3935, 2012. 査読有
DOI: 10.1109/CDC.2012.6426880
- [5] K. Takaba: "Robust synchronization of nonlinear agents over directed communication graph," *Preprints of 7th IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND'12)*, pp. 33-38, 2012. 査読有
DOI: 10.3182/20120620-3-DK-2025.00167

[学会発表](計 9 件)

- [1] 鷹羽浄嗣: "入力飽和を有する線形マルチエージェントシステムの同期: 出力フィードバックの場合," 第 57 回自動制御連合講演会, 2014 年 11 月 12 日, ホテル天坊 (群馬県渋川市)。
- [2] K. Takaba: "Robust synchronization over stochastically switching networks," *46th ISIC Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and its Applications (SSS'14)*, 2014 年 11 月 1 日, 京都工芸繊維大学 (京都府京都市)。
- [3] T. Miyazaki and K. Takaba: "Formation control of mobile robots with obstacle avoidance," *14th Int. Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS2014)*, 2014 年 10 月 22 日, KINTEX (Goyang, Korea)。
- [4] K. Takaba: "Synchronization of linear multi-agent systems under input saturation," 第 1 回 SICE 制御部門マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 5 日, 電気通信大学 (東京都調布市)
- [5] 鷹羽浄嗣: "入力飽和を有するエージェント群の同期," 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月 17 日, 新潟大学 (新潟県新潟市)

- [6] K. Takaba: "Synchronization over stochastically switching networks with imperfect prior information," *45th ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS2013)*, 2013年11月02日, 琉球大学 (沖縄県那覇市)
- [7] 鷹羽浄嗣: "領域極配置に基づく非線形振動子ネットワークの同期化," 第55回自動制御連合講演会, 2012年11月18日, 京都大学 (京都府京都市)
- [8] K. Takaba: "Output synchronization of passive agents over stochastically switching networks," *44th ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS2012)*, 2012年11月02日, 国土館大学 (東京都)
- [9] H.L. Trentelman and K. Takaba: "Robust synchronization of linear multi-agent systems with additive uncertainty," *20th Int. Symp. on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS2012)*, 2012年07月12日, Univ. of Melbourne (Melbourne, Australia)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鷹羽 浄嗣 (TAKABA, Kiyotsugu)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 30236343