

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760336

研究課題名(和文) ネットワークシステムに対する分散制御器設計理論の体系化

研究課題名(英文) Development of a design theory of distributed controllers for networked systems

研究代表者

櫻間 一徳 (Sakurama, Kazunori)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10377020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、サーバーやロボット等がネットワーク上で情報交換をしながら、タスクを達成するための分散制御器の設計理論を体系化した。分散制御器とはネットワーク上で直接手に入る情報のみを用いる制御器である。これによって個々が扱う情報量と計算負荷が低減するものの、利用できる情報が減るため、必ずしもタスクを達成できなくなる。ここでは、タスクの達成という観点から最適な分散制御器を設計する方法を提案した。さらに、スマートグリッド等に対して提案法を応用することで、その有効性を確認した。以上より、分散制御というシステムへの負荷の小さい方法でQOL(Quality of Life)を改善できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a design theory for distributed controllers of networked systems has been developed. In networked systems, servers, robots and so on attempt to achieve given tasks through communication over the networks. Distributed controllers use only local information directly obtained from the networks. Thus, the amount of information and computation burden of each component can be decreased. However, due to the lack of the information in each component, the given tasks are not necessarily attained. Therefore, in this research, a design method of distributed controllers has been established, which is optimal from the viewpoint of achieving the given tasks. Moreover, this method has been applied to smart grids, and the effectiveness has been confirmed. This result illustrates that the QOL (Quality of Life) can be improved by a load-balanced method via distributed controllers.

研究分野：制御工学

キーワード：ネットワークシステム 分散制御 制御器設計 マルチエージェントシステム

1. 研究開始当初の背景

(1) ネットワークシステムと分散制御

近年の情報通信技術(ICT)の進歩によって、大量のエージェント(ロボットや車両など単一システムの呼称)から構成されるネットワークシステムが次々と生まれている。このようなシステムでは、ネットワークを通じて得られる情報を基にエージェントを制御する、いわゆる分散制御の技術が必須となる。分散制御は、レスキューロボット群による災害現場の探索、移動ロボット群によるセンサネットワーク構築、高速道路における自動車のクルーズコントロール、スマートグリッドにおける家庭の消費調整など、様々な分野における基礎技術として注目されている。

(2) 分散制御における既存研究の問題点

ネットワークシステムにおいては、エージェント単体で独立に性能向上を図っても、システム全体では制御性能が上がらない問題がある。例えば、自動車のクルーズコントロールでは、自動車が等間隔の列で走行することが望まれている。この際、一部の自動車の追従性が高いと、自動車の間隔にムラが生じ、それが増幅し、渋滞が引き起こされることが知られている。この場合は、各自動車は周辺に協調して、少しずつ間隔を合わせるほうが収束性はよくなる。このように、ネットワークシステムでは、エージェント単体ではなくシステム全体で制御性能を向上させるように、各エージェントの分散制御器を設計しなければならない。しかし、これまで、分散制御器の設計はケース毎に試行錯誤的に行われており、どのように設計・調整したらよいか、一般解は得られていない。

2. 研究の目的

(1) 分散制御器の設計理論の体系化

本研究では、分散制御器のうち最適なものを選択する理論を体系化することを目的とする。このため、ネットワークシステムにおいて実装可能である、分散制御器のクラス全体をある種のパラメータによって表現する。このパラメータ表現を用いることで、自由度であるパラメータの調整によって、システム全体の制御性能を最適化することが可能となる。このようなパラメータ表現を基にした分散制御器の設計理論を体系化することで、これまで各分野で試行錯誤的に行われてきた分散制御器の設計を統一化する。

(2) 提案法の有効性の実証

提案する分散制御器の設計理論を現実的なネットワークシステムに対して応用することで、提案法の有効性を確認する。

3. 研究の方法

(1) すべての分散制御器のパラメータ表現

エージェントとネットワークのモデル化を行い、エージェントがネットワークにおいて

実装可能な、すべての分散制御器のパラメータ表現を与える。具体的には、以下を実行する。

- ① 対象とするエージェントのモデルを特定する。ここでは、図1のように、エージェントのダイナミクスと設計可能な制御器からなる標準的なモデルを考える。

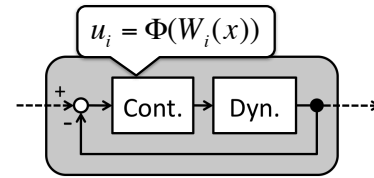


図1：エージェントの標準モデル

- ② エージェント同士の情報交換を表すネットワークのモデル化を行う。図2のようなネットワークをグラフ(エージェントと接続の集合)によって表現する。

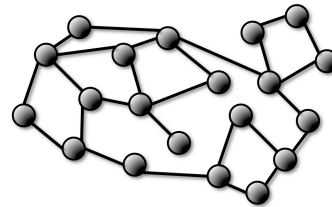


図2：ネットワークの例

- ③ 以上の設定のもと、各エージェントの制御器として実装可能な分散制御器のクラスを検討する。このような分散制御器のすべてをある種のパラメータによって表現する。特に、図1のように、構造と自由度であるパラメータに分けた形式で与えることが重要である。

(2) 最適な分散制御器の設計法の確立

以上のパラメータ表現を用いて、システム全体で達成すべきタスクが与えられた場合に、ある種の最適な分散制御器を設計する方法を確立する。具体的には、以下の内容を実行する。

- ① 自由度として与えられたパラメータから、システム全体がタスクを実行するクラスを特定する方法を提案する。これによって、考慮すべきパラメータをさらに限定することができる。
- ② 以上で得られたパラメータのクラスから、制御性能を最適化するパラメータを選定する方法を提案する。選定されたパラメータを図1の制御器の構造部分に代入することで、最適な分散制御器が設計される。

4. 研究成果

(1) 制御性能の評価指標の統一化

まず取り組んだことは、次のような具体的なテーマにおいて制御性能の評価指標を与え

ることである。

- ① ロボット群の衝突回避問題：軌道追従するロボット群の衝突回避行動に対する制御性能を所望軌道・速度からの偏差によって評価した。（雑誌論文⑤, ⑥）
- ② 時間遅延のあるシステムの合意問題：非一様な時間遅延をもつネットワークの合意問題に対して、制御性能を合意基準からの偏差によって評価した。（雑誌論文②）
- ③ 分散的パターン選択（図3参照）：外部環境に応じて一つのフォーメーションパターンを選択・形成する配置問題に対し、制御性能を各パターンからの偏差の積によって評価した。

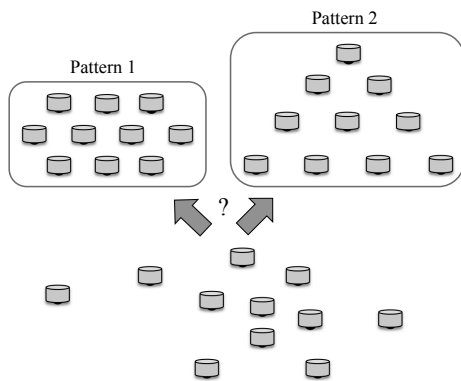


図3：分散的パターン選択

以上の取り組みを通して、マルチエージェントシステムの制御問題の多くは、エージェント全体の状態を「目標点」ではなく、「目標集合」に収束させる問題として捉えられることがわかった。目標集合の例として、合意問題では直線、被覆問題では点群、分散的パターン選択は直線群が与えられる。（図4参照）状態を目標集合上のどの点に収束させるのかをネットワークを通じて決めることが、マルチエージェントシステムの制御問題の本質である。以上の解釈によって、マルチエージェントシステムに対する統一的な性能評価指標として、最悪ケースにおける状態の収束点と目標集合の距離を採用するという発想を得た。

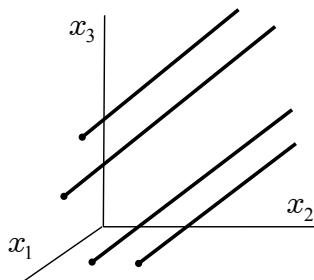


図4：分散的パターン選択の幾何的表現

(2) 最適分散制御器の設計法の確立
次に、以下のようにして統一的な評価指標に関して最適分散制御器の設計法を確立し

た。

- ① 勾配型分散制御器のパラメータ表現：勾配法に基づく分散制御器の必要十分条件を導出し、与えられたネットワーク構造に対する分散制御器のすべてをあるパラメータ表現に帰着させた。これによって、自由度であるパラメータを制御目的に応じて設計しさえすれば、所望の分散制御器を設計できるようになった。（雑誌論文⑦, 学会発表④）
- ② 最適分散制御器の設計理論：分散制御器のパラメータ表現の中から、統一的な評価指標を最適化するものを与える方法を導出した。パラメータ表現の結果が必要十分条件であるため、これより性能のよい分散制御器が存在しないことが保証される。（雑誌論文①, 学会発表③）

以上の取り組みによって、分散制御器を設計する際のネットワークにおける基礎単位は、従来考えられていたエッジではなく、「クリーク」（完全部分グラフ）であることを世界に先駆けて明らかにした。したがって、クリーク単位で構成した制御器から最適なものを選べば、分散制御器全体から最適なものを選ぶことができることがわかった。以上によって、ネットワーク構造とその分散制御器で得られるベストパフォーマンスの関係性というマルチエージェントシステムの制御における根本的な性質を抽出することに成功した。

(3) 社会システムへの応用

本研究の応用として、ロボット群のフォーメーション制御法（雑誌論文⑧など）の他にも、社会システムにおける諸問題を解決するツールを開発した。

- ① 価格調整によって電力システムの需給バランスを取るリアルタイムプライシングの研究において、需要家・供給家が分散的に価格を決める「交渉型リアルタイムプライシング」を開発した。（雑誌論文③, 学会発表①）
- ② アクティブノイズキャンセルに関する研究において、複数スピーカークの分散制御によって広範囲に消音を行う「アクティブ音響シールドディング」を開発した。（雑誌論文④）
- ③ 分散的に動作するプロトコルによってインターネットを安定化するためのパラメータの条件を明らかにした。（学会発表②）

以上のような社会システムへの応用可能性の点から、今後、本研究結果が社会に及ぼす影響は大きいと考えられる。

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8件）

- ① K. Sakurama, S. Azuma and T. Sugie, Distributed Controllers for Multi-Agent Coordination via Gradient-Flow Approach, The IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 60, No. 6, 2015
DOI:10.1109/TAC.2014.2374951
- ② K. Sakurama and K. Nakano, Necessary and Sufficient Condition for Average-consensus of Networked Multi-Agent Systems with Heterogeneous Time-Delays, International Journal of Systems Science, Vol. 46, No. 5, pp. 818-830, 2015
DOI:10.1080/00207721.2013.798442
- ③ 桜間一徳, 三浦政司, 分散制御と価格調整によるネットワークフロー制御, 電子情報通信学会和文論文誌 A, 査読有, J98-A, No. 3, pp. 267-273, 2015
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j98-a_3_267
- ④ T. Murao, M. Nishimura, K. Sakurama and S. Nishida, Basic Study on Active Acoustic Shielding (Improving Noise-Reducing Performance in Low-Frequency Range), JSME Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol. 1, No. 6, 2014
DOI: 10.1299/mej.2014eps0065
- ⑤ 鈴木学, 桜間一徳, 中野和司, ロボット群移動のための隊列維持を考慮したリーダー追従型隊列誘導, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 2, pp. 302-309, 2013
https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicetr/49/2/49_302/_article/-char/ja/
- ⑥ M. Suzuki, K. Sakurama and K. Nakano, Online Leader-Following Formation Navigation with Initial Movements of Followers and Its Experimental Verification, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 5, No. 5, pp. 304-310, 2012
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/5/5/5_304/_article
- ⑦ 桜間一徳, 東俊一, 杉江俊治, マルチエージェントシステムに対するすべての勾配型分散制御器のパラメータ表現, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 48, No. 6, pp. 311-317, 2012
https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicetr/48/6/48_311/_article/references/-char/ja/
- ⑧ 桜間一徳, 宮崎裕史, 中野和司, 細川崇, マルチエージェントシステムによる逃避ターゲットの包囲と誘導, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 48, No. 4, pp.

224-231, 2012

https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicetr/48/4/48_224/_article

[学会発表] (計4件)

- ① K. Sakurama and M. Miura, Complete Distributed Optimization with Constraints on Networked Multi-Agent Systems, The 14th annual European Control Conference, 査読有, July 15-17, 2015
- ② K. Sakurama, E. I. Verriest and M. Egerstedt, Effects of Insufficient Time-Scale Separation in Cascaded, Networked Systems, The 2015 American Control Conference, 査読有, July 1-3, 2015
- ③ K. Sakurama, S. Azuma and T. Sugie, Optimal Distributed Controllers Based on Gradient-flow Method for Multi-Agent Coordination, The 52nd IEEE Conf. on Decision and Control, 査読有, December 10-13, 2013
- ④ K. Sakurama, S. Azuma and T. Sugie, Parameterization of All Distributed Controllers Based on Gradient-Flow Method for Networked Multi-Agent Systems, The 51st IEEE Conf. on Decision and Control, 査読有, December 10-13, 2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桜間 一徳 (SAKURAMA, Kazunori)
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10377020

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし