

## 研究テーマ：大規模システムの制御系設計理論の体系化

近年、センサネットワークやスワームロボティクスなどの工学システムから電力システムや交通システムなどの社会インフラまで、様々な分野において大規模システムの制御が重要になっている。多数の要素から構成される大規模システムでは全体の状況を把握することが難しいため、これまでの制御理論とは異なるアプローチが必要とされる。そこで、近年、各構成要素が互いの通信・センシングによって情報交換を行いながら、局所情報のみを用いて自律制御する「分散制御」という概念が重要視されている。この制御方式は、各要素の処理負荷がシステムの規模に依存しない「スケーラブル」という性質をもつため、大規模システムの制御には不可欠である。

一方、大規模システムには、全体で達成すべきタスクが与えられている。例えば、スワームロボットがフォーメーションを形成する、電力システムにおいて需給バランスを取るというものである。各要素はタスクを実現するように連携する「協調制御」に基づいて動作する。しかし、局所情報のみを用いる分散制御では十分な情報が得られないため、その中で協調制御を行っても、実際にタスクは実現されない可能性がある。

現在、多くの研究者は試行錯誤的に分散協調制御器を設計し、その制御器によってタスクを実現できるパラメータやネットワーク構造（要素同士の情報伝達経路）に関する条件を導出している。しかし、このアプローチでは、設計した制御器でタスクが実現できない場合でも、他の制御器で（より高性能に）タスクを実現できる可能が常にある。

このような問題を解決するため、大規模システムの制御器設計理論の体系化を進めている。試行錯誤的に設計する既存法とは異なり、提案する理論に基づいて設計された制御器はある種の最適性を保証することができる。このような理論の体系化を世界に先駆けて行ったことが大きな成果である。さらに、このような設計理論を元に、ロボット群のフォーメーション制御や電力ネットワークの安定化、フローネットワークのスケーラブル安定化に関する研究を進めている。

得られた成果の詳細は以下である。

### (1) ネットワーク上で最適な協調分散制御器の設計理論とその応用

ネットワークを通じて要素間で通信を行う大規模システムでは、得られる制御性能がネットワーク構造に大きく影響される。つまり、構造が密（疎）であるほど制御性能は上がる（下がる）。このような観点から、ネットワーク構造が与えられたときに、ある評価指標の意味において最適な分散協調制御器を設計する方法を確立した。これによって、最適な制御器はネットワークのグラフにおける「クリーク」つまり完全部分グラフ（Fig. 1 参照）に依存する関数の和で構成されることがわかった。従来研究は「エッジ」つまり2要素間のつながりを用いたのに比べ、本研究はクリークというそれ以上の要素のつながりを用いても制御器の分散性が崩れないこと、さらにこれが最適であることを世界に先駆けて明らかにした。

つぎに提案法をロボット群のフォーメーション制御に応用した。このような問題は、システム全体の状態を「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に着目した。例えば、外部環境に応じて複数の配置パターンから一つを選択・形成するというフォーメーション選択問題（Fig. 2 参照）では、目標集合は各直線が各配置パターンに相当する直線群となる。以上の観点から、収束点と目標集合の最悪値という観点から、最適な制御器を設計した。さらに、Fig. 3 のようなロボット群を製作し、実験によって提案法の有効性を示した。

- K. Sakurama, S. Azuma, and T. Sugie. Multi-agent coordination to high-dimensional target subspaces. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 345–358, March 2018

- K. Sakurama, Y. Kosaka, and S. Nishida. Formation control of swarm robots with multiple proximity distance sensors. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 16, No. 1, p. 1626, January 2018. (IF:1.687)
- K. Sakurama and M. Miura. Distributed constraint optimization on networked multi-agent systems. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 292, pp. 272–281, January 2017. (IF:1.738)
- K. Sakurama, S. Azuma, and T. Sugie. Distributed controllers for multi-agent coordination via gradient-flow approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 60, No. 6, pp. 1471–1485, June 2015. (IF: 4.27)
- 桜間一徳, 東俊一, 杉江俊治. 分散的パターン選択によるマルチエージェントシステム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. 25, No. 3, pp. 45–53, March 2012

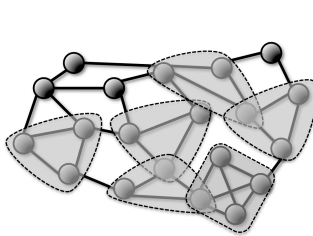


Figure 1: グラフにおけるクリーク：グラフにおいて、点線で囲った三角形は3位クリーク、四面体は4位クリークを表す。

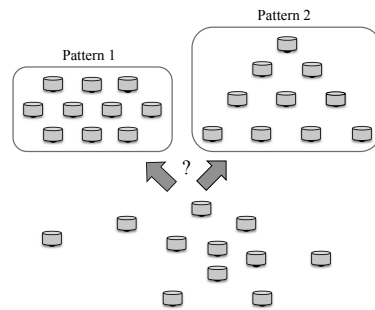


Figure 2: フォーメーション選択問題：リーダーなしで外部環境に応じて複数の配置パターンのいずれかを選択する。

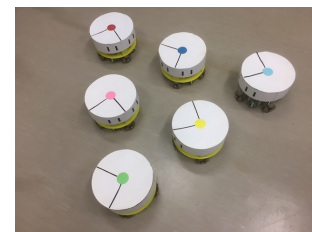


Figure 3: フォーメーション制御：6台のロボットによるフォーメーション制御の様子。

(2) スーパーバイザーに頼らない大規模システムの分散最適化とその応用

大規模システムにおける拘束条件のある最適化問題をスーパーバイザーに頼らず分散的に解決する手法を確立した。これまでに、交互方向乗数法 (ADMM) に基づくものなど分散的な最適化手法は多数提案されている。しかし、既存法では決定変数は分散的に更新されるものの、ラグランジュ乗数の更新には全ての要素の情報を用いていた。このため、スーパーバイザー（データを集約するサーバー）が必要であり、完全な分散的手法とは言えなかった。そこで、ネットワークを通じた要素間の情報交換をもとにラグランジュ乗数も含めて分散的に更新する方法を、「完全な分散最適化法」として世界に先駆けて確立した。

つぎに提案法を、群ロボットによる複数極値探索と電力システムの制御 (Fig. 4 参照) に応用した。電力システムでは、需要・供給者の効用関数を最大化しながら、マイクログリッド毎の需給インバランスを零にすることが求められている。上述のスーパーバイザーに頼らない分散最適化法に基づき、需要・供給者のスマートメーターによる通信を用いた電力システム制御法を提案した。これによってデータを集約するサーバー等の情報インフラを設置する必要がなくなるため、低コストで大規模システムを管理することが可能となる。

- 三浦政司・桜間一徳. 需要供給予測を伴う分散型リアルタイムプライシング. システム制御情報学会論文誌, Vol. 31, No. 3, pp. 121–128, March 2018
- K. Wada and K. Sakurama. Privacy masking for distributed optimization and its application to demand response in power grids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 6, pp. 5118–5128, June 2017. (IF:7.168)

- K. Sakurama and M. Miura. Communication-based decentralized demand response for smart microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 6, pp. 5192–5202, June 2017. (IF: 7.168)
- 和田一真, 桜間一徳. 分散最適化における情報マスキング法とリアルタイムプライシングへの応用. 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 12, pp. 671–677, December 2016
- M. Miura, Y. Tokunaga, and K. Sakurama. Graphical and scalable multi-agent simulator for real-time pricing in electric power grid. *Artificial Life and Robotics*, Vol. 21, No. 2, pp. 181–187, June 2016
- 桜間一徳, 安木洋介, 西田信一郎. 分散最適化に基づくロボット群による複数極値探索. システム制御情報学会論文集, Vol. 29, No. 4, pp. 155–161, April 2016

(3) フローネットワークシステムのスケラブル制御とその応用

ものをネットワークに沿って需要地まで流すフローネットワークの分散制御について考えた。まず、電力システムにおけるデマンドレスポンスに対応する問題として、枝における分散制御とももの価格制御を組み合わせる方法を提案した。これによって、集中制御機構がなくとも、ものを頂点に停留させずに需要地まで届けることができることを示した。つぎに、通信システムとして、ルーターを介して遠隔地のユーザーにデータを届けるモデルの安定解析を行った。複数のクライアントのデータフローが干渉し合うことを考えていることが従来と異なる。Fig. 5 のように、複数の無人飛行機がいくつかのルーターを介してデータをオペレーターに送信する際に、パケットがルーターで混雑するような場合である。このようなシステムは、単一のデータフローのシステムが安定でも、クライアントの数によっては不安定になり得る。そこで、クライアントがどれだけ存在してもシステム全体が安定である「スケラブル安定」という概念を確立し、スケラブル安定であるための必要十分条件を世界で初めて導出した。

- K. Sakurama, E. I. Verriest, and M. Egerstedt. Scalable stability and time-scale separation of networked, cascaded systems. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 321–332, March 2018
- K. Sakurama. Distributed flow network control with demand response via price adjustment. *Neurocomputing*, Vol. 270, pp. 34–42, December 2017. (IF:3.317)
- 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, Vol. J98-A, No. 3, pp. 267–273, March 2015

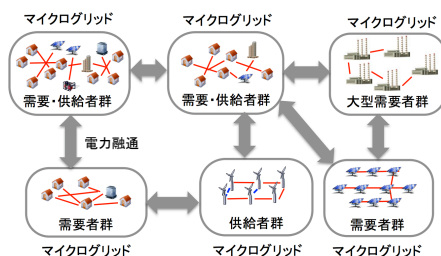


Figure 4: 電力システム：いくつかのマイクログリッド (MG) から構成されており、各 MG が需給バランスを保持する。MG には需要家・供給家が存在し、スマートメーターによる情報通信が可能である。

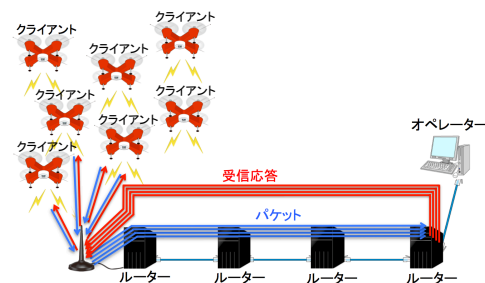


Figure 5: 複数の無人飛行機によるデータ収集：複数の無人飛行機がルーターを介して、オペレーターにデータを送信する。データが届くとオペレータは受信応答する。