

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06143

研究課題名(和文)大規模ネットワークシステムの完全分散最適化理論の体系化と社会システムへの応用

研究課題名(英文) Systemization of completely distributed optimization theory for large-scale systems and its application to social systems

研究代表者

櫻間 一徳 (Sakurama, Kazunori)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10377020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、完全分散最適化という概念を提唱し、それを実現するためのアルゴリズムを設計した。提案アルゴリズムの核となるのは、各ユーザーがユーザー同士の通信を用いて大域情報の推定精度を高めるものである。これによって、中央管理センターに頼ることなく大規模システムを制御することが可能となった。さらに、最適化問題の解が得られるための通信ネットワークの構造の必要十分条件を導出した。最後に、提案アルゴリズムを電力システムとセンサネットワークに適用し、その実用性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a concept of a completely distributed optimization and designed an algorithm to realize this optimization. The core of the proposed algorithm is to enhance the accuracy of the estimation of global information by each user via communication between users. This enables us to control large-scale systems without centralized management systems. Moreover, we derived a necessary and sufficient condition of the topologies of communication networks to obtain solutions of optimization problems. Finally, we showed the practicability of the proposed algorithm by applying it to a power system and a sensor network.

研究分野：制御工学

キーワード：分散制御 分散最適化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、電力不足や資源確保のために、太陽光や風力などの再生可能エネルギーが電力システムに導入されつつある。自然エネルギーによる発電量は正確には予測できないため、安定な電力供給の実行はいつそう困難になる。このような中、電力供給の代替として、電力価格を変動させることで需要抑制を行う「リアルタイムプライシング」が注目されている。これは、電力の過不足に応じて価格を調整し、それを消費者に提示することで、電力需要を制御する方法である。

(2) リアルタイムプライシングにおける適正価格を決める方法として、「分散最適化」の技術を用いることが提案されている。分散最適化とは、散らばって存在するユーザーが局所情報から計算を行う方法であり、様々な大規模システムの最適化問題をリアルタイムで解く方法として注目されている。分散最適化のアルゴリズムは自身およびネットワークでつながった相手の情報のみを用いるものである。

(3) これまで提案されている分散最適化のアルゴリズムには次のような欠点があった。

変数更新則に、拘束条件に関わる大域情報が存在する。したがって、それを配信する中央管理センターが必要であるが、ユーザーが増えると中央管理センターに膨大なデータが集中し、対処できなくなる。

個々のアルゴリズムは各々あるクラスの最適化問題を解くように設計されている。したがって、どのようなクラスの最適化問題を解けるのかという観点での、アルゴリズムのもつ性能については議論されていない。

### 2. 研究の目的

(1) 主たる目的は、全体を統括する機関が存在しない分散最適化、すなわち、完全分散最適化という概念を確立することである。ついで、提案するアルゴリズムによる性能限界を導出するために、分散的に解決できる最適化問題のクラスを明らかにする。

(2) 次の目的は、提案アルゴリズムの応用可能性を示すことである。そのため、リアルタイムプライシングによる電力システムの制御および広域センサネットワークによる環境測定を取り上げる。

### 3. 研究の方法

(1) 大域情報が不要である完全分散最適化法を構築する。ここでは、各ユーザーの持つ変数の更新のみならず、大域情報の推定を各ユーザーに局所情報のみを用いて行わせることで、完全分散最適化を実現する。このような制限の元、実際に最適化問題の解が得ら

れるような分散アルゴリズムを設計する。

(2) 分散アルゴリズムによって解決できる最適化問題のクラスを導出する。問題の可解性は、目的関数・制約関数およびネットワーク構造に依存するため、問題が可解となる関数の集合(凸集合の部分集合)を、ネットワークの構造に着目した形式として見いだす。

(3) 提案する完全分散最適化を電力システムおよびセンサネットワークに適用し、理論的な保証がある管理システムの構築を行う。

### 4. 研究成果

(1) 研究の核となる完全分散最適化の理論構築を行った。提案アルゴリズムは拘束条件に関わる大域情報であるラグランジュ乗数を直接利用しないものである。代わりに各ユーザーが局所情報に基づいて、ラグランジュ乗数の値を推定する。その際、推定値をユーザー間のネットワーク通信によって更新し、精度を高めることがアルゴリズムの核である。提案アルゴリズムによって計算負荷を分散することが可能になり、中央管理センターに頼ることなく大規模システムを制御することが可能となる。完全分散最適化という概念自体が斬新であり、そのアルゴリズムを国内外で初めて考案することに成功した。その成果は、IEEE Transactions on Industrial Electronics という最も権威のある国際雑誌の一つに掲載されており、国際的にも評価されている。

(2) 提案アルゴリズムはユーザー間の情報交換を必要とする。実際に、最適化問題の解が正しく得られるかどうかは、情報交換のネットワーク構造に依存する。本研究を通じて、正しい最適化問題の解が得られるためのネットワーク構造の必要十分条件を導出した。具体的には、強連結性という、どのような二つのエージェントも一方からもう一方へ迎えることのできる構造が必要であることがわかった。これは必要最低限なネットワーク構造を表すため、この成果によって余分な通信経路をカットし、ネットワーク構築のコストを抑えることができるようになった。これによって、後述するスマートグリッドやセンサネットワークにおける省エネ化を測ることが期待できる。

(3) 提案アルゴリズムを電力システムの制御に応用するための管理システムを考案した。ここで想定する電力システムは、ユーザー(家庭またはアグリゲータといういくつかの家庭を束ねる機構)による交渉によって電力価格を決め、電力使用量を変化させる、交渉型リアルタイムプライシングが実装されているものである。構築した方法論は、電力システムが安定的に同時同量(電力需要量と供給量を一致させること)を達成するための

交渉の手順,つまりプロトコルである.提案アルゴリズムは,通信ネットワークでつながっている相手とのみ交渉が可能であるという分散型プロトコルに基づいていることが特徴である.さらに,マルチエージェントシミュレータ「artiso」によるシミュレーションを行った.この際,交渉型リアルタイムプライシングが実装されている電力システムにおいて,発電機一台が故障するというシナリオを想定した.実際に,提案する分散型プロトコルが効果的に働き,電力不足を解決することをシミュレーション上で確認した.提案プロトコルは,大量に存在する消費者の情報を集約することなく実行できるため,安価な情報インフラによってリアルタイムプライシングを実現することを可能とする.

(4) 提案アルゴリズムを広域センサネットワークに適用した.具体的には,ロボットに搭載した移動式のセンサ群を対象にし,フィールドへの適切な散開の仕方と決められたフォーメーション形状の維持方法について検討した.まず,フィールドへの散開の仕方として,フィールド上の重要度に応じて散開するセンサの密度を決めることにした.その際,一部の重要な部分に多くのセンサが集まることがないように,センサ群の位置の分散を所望の値にする方法を提案した.この分散の値を求めるにはセンサ群全体の情報を必要とするが,これを分散的に求めるために提案した完全分散制御法を利用した.さらに,シミュレーションによって,100台以上のセンサが一箇所に集まることなく適切に複数の重要点を覆うことができることを確認した.次に,センサ群が決められたフォーメーション形状を維持するための方法について検討した.ここでは,個々のセンサが直接得る近隣センサの距離情報のみを利用する分散制御手法を提案した.さらに,オムニタイヤによって移動するロボット6台を製作し,提案法を用いて適切にフォーメーションを形成できることを確認した.

## 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10件)

Kazunori Sakurama, Hirotsuke Yasuki, Shin-ichiro Nishida, Multiple Source Seeking via Distributed Sample-Variance Control of Swarm Robots, IMA Journal of Mathematical Control and Information, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/imamci/dnx026>

Kazunori Sakurama, Yusuke Kosaka, Shin-ichiro Nishida, Formation Control of Swarm Robots with Multiple Proximity Distance Sensors,

International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 16, No. 1, pp.16-26, 2018, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-016-0741-z>

Brian D.O. Anderson, Zhiyong Sun, Toshiharu Sugie, Shun-ichi Azuma, Kazunori Sakurama, Formation shape control with distance and area constraints, IFAC Journal of Systems and Control, Vol. 1, pp. 2-12, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2017.05.001>

Kazunori Sakurama, Shun-ichi Azuma, Toshiharu Sugie, Multi-agent coordination to high-dimensional target subspaces, IEEE Transactions on Control of Network Systems, Vol.5, No.1, pp. 345-358, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1109/TCNS.2016.2609638>

Kazunori Sakurama, Erik I. Verriest, Magnus 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, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1109/TCNS.2016.2609146>

Kazunori Sakurama, Leader selection via LASSO for formation control of time-delayed multi-agent systems, Neurocomputing, Vol. 270, pp. 18-26, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.12.108>

Kazuma Wada, Kazunori 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, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2668981>

Kazunori Sakurama, Masashi Miura, Communication-based Decentralized Demand Response for Smart Microgrids, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 6, pp. 5192-5202, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2631133>

桜間一徳, マルチロボットの協調分散制御, 養賢堂「機械の研究」, 査読無, Vol.69, pp.196-202, 2017

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値探索, システム制御情報学会論文誌,

〔学会発表〕(計 21 件)

- Kazunori Sakurama, Hyosung. Ahn, Index-free assignment formation of networked multi-agent systems, American Control Conference, 2018
- 小川剛史, 桜間一徳, 測距センサと無線通信を併用したリーダーロボットの位置推定, 第 5 回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2018
- 桜間一徳, Hyosung Ahn, マルチエージェントシステムのインデックスフリーフォーメーション制御, 第 5 回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2018
- Brian D.O. Anderson, Zhiyong Sun, Toshiharu Sugie, Shun-ichi Azuma, Kazunori Sakurama, Distance-based rigid formation control with signed area constraints, The 56th IEEE Conference on Decision and Control, 2017
- Kazunori Sakurama, Formation control of multi-agent systems with the scale freedom, The second International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, 2017
- Kazunori Sakurama, Distributed Control of Networked Multi-agent Systems for Formation with Freedom of Special Euclidean Group, The 55th IEEE Conference on Decision and Control, 2016
- Kazunori Sakurama, Control of Large-scale Cyber-physical Systems with Agents via a Representative Model, The 4th IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, 2016
- Kazuma Wada, Kazunori Sakurama, Masking Method for Local Information on Distributed Optimization with Constraints, The 4th IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, 2016
- Kazunori Sakurama, Formation Control of Multi-Agent Systems with Freedom of Rotation and Translation, Proc. of SICE Annual Conference, 2016
- Kazunori Sakurama, Multi-Robot Formation Control Over Distance Sensor Network, The 6th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems, 2016
- Kazuma Wada, Kazunori Sakurama, Masking Method of Private Information for Distributed Optimization and Its Application to Real-Time Pricing, The

22nd International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 2016

桜間一徳, ネットワーク分散制御器に基づく大規模システムの状態総和制御, 第 4 回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017

Kazunori Sakurama, Shun-ichi Azuma, Toshiharu Sugie, Distributed Control of Networked Multi-agent Systems for High-dimensional Coordination, The 54st IEEE Conf. on Decision and Control, 2015

Kazunori Sakurama, Shin-ichiro Nishida, Source Seeking by Distributed Swarm Robots with Sample Variance Control, American Control Conference, 2016

Kazunori Sakurama, Hirosuke Yasuki, Shin-ichiro Nishida, Multiple Source Seeking by Swarm Robots with Decentralized Sample Variance Control, The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, 2015

桜間一徳, マルチエージェントシステムの制御(3)合意制御, 第 58 回 自動制御連合講演会(招待講演), 2015

安木 洋介, 桜間一徳, 西田信一郎, ロボット群による複数極値探索のためのフォーメーション制御, 第 58 回 自動制御連合講演会, 2015

小阪悠介, 桜間一徳, 西田信一郎, 測距センサのネットワークによる複数ロボットのフォーメーション制御, 第 58 回 自動制御連合講演会, 2015

桜間一徳, 東俊一, 杉江俊治, 分散制御によるマルチエージェントシステムの高次元配置問題, 第 3 回 制御部門マルチシンポジウム, 2016

桜間一徳, 特殊ユークリッド群の自由度をもつフォーメーションに対する最適分散制御器設計, 第 3 回 制御部門マルチシンポジウム, 2016

- 21 小阪悠介, 桜間一徳, 西田信一郎, 測距センサを搭載した複数ロボットのフォーメーション制御法と実験検証, 第 3 回 制御部門マルチシンポジウム, 2016

〔図書〕(計 1 件)

東, 永原, 石井, 林, 桜間, 畑中, コロナ社, マルチエージェントシステムの制御, 2015, 総ページ数 218 (pp.61 ~ pp.121 担当)

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

西田 信一郎 (NISHIDA, Shin-ichiro)

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50358529

三浦 政司 (MIURA, Masashi)

鳥取大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80623537