

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04531

研究課題名（和文）サイバーフィジカルシステムにおけるロバスト大規模インセンティブ設計論の新展開

研究課題名（英文）A New Development of Robust Large-Scale Incentive Design for Cyber-Physical Systems

研究代表者

向谷 博明（Mukaidani, Hiroaki）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：70305788

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：サイバーフィジカルシステムにおけるロバスト大規模インセンティブ設計に関して、インセンティブ存在条件をはじめ、インセンティブの計算に必要なアルゴリズム並びに、低次元化手法の開発に成功した。具体的には、まず、インセンティブの存在性を判別できる「インセンティブ可能性」の概念を大規模連立型行列方程式によって表現した。次に、部分観測値や時間遅れ等の不確定情報にロバストな大規模インセンティブ設計問題を定義し、非線形凸最適化手法による求解アルゴリズムを確立した。これらの設計手法は、低次元逐次計算可能な最適化問題からなり、多項式時間で、高速かつ安定に実行可能であり、ロバストな収束を達成することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案されたインセンティブ戦略設計手法は、大規模連立型行列方程式を扱う代わりに、低次元分散型行列方程式を解くことに基づいている。さらに、低次元行列方程式を繰返し解くことによって、高速かつ意思決定者数に依存することなくインセンティブが計算可能となった。一方、実際のサイバーフィジカルシステムへ適用するため、不確定要素をウィナー過程とみなすことにより、確率インセンティブ戦略設計法も提案した。その結果、実際の社会システムにおける問題を扱うことが可能となった。これらは、不確かさが存在しても、ロバストな低次元インセンティブ戦略を実用的な設計論の枠組みで設計出来るようになった点で、非常に有用な結果である。

研究成果の概要（英文）：A robust large-scale incentive design for cyber-physical system (CPS) has been successfully developed in terms of incentive existence conditions, algorithms necessary for calculating incentives, and dimensionality reduction methods. Specifically, the concept of "incentive possibility", which can determine the existence of incentives using large-scale simultaneous matrix equations, has been established. Then, a large-scale incentive design problem that is robust to uncertain information such as partial observations and time delays was solved, and a solution algorithm using a nonlinear convex optimization method was established. It has been shown that these design methods consist of optimization problems that can be computed sequentially in low dimensions, are fast and stable in polynomial time, and achieve robust convergence.

研究分野：システム理論

キーワード：サイバーフィジカルシステム インセンティブ 平均場ゲーム理論 確率システム

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高速情報通信技術を基盤に、フィジカル空間(現実空間)で情報を収集し、サイバー空間(仮想空間)により理解・分析した後、それらの結果をフィードバックすることで付加価値を創出する技術として、サイバーフィジカルシステム(CPS)の概念が用いられるようになった。CPSに代表される大規模電力システムにおいては、太陽光等の再生可能エネルギーの普及により、発電・消費電力を観測して、スマートメータ等のスマート端末を介して、最適な電力消費や売電価格を決定し、電力消費コストを削減する戦略構築が非常に重要である。このような戦略を構築する場合、電力会社のような大口発電事業者のみならず、電力需要家である小規模事業者や一般家庭等、大規模小口電力需要家が存在するため、戦略設計に用いる観測情報が局所的にしか得られない場合が存在する。さらに、システム自体の大規模・複雑化によって、情報伝達の遅延が起ることが知られている。したがって、このような局所不確定情報に対して、ロバスト(頑強)な戦略設計が強く望まれている。

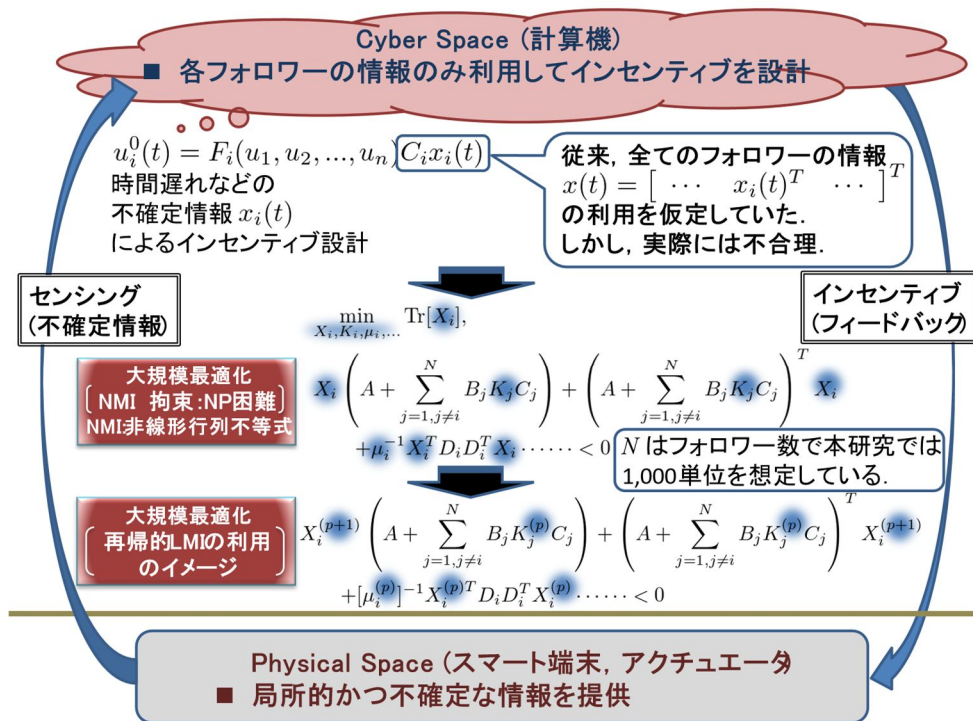
一方、CPSにおいて、個々の意思決定を行う手法として、動的ゲーム理論が良く利用されている。特に、電力需給安定化に関する階層戦略としては、インセンティブシュタッケルベルグ戦略が有名である。インセンティブシュタッケルベルグ戦略は、例えば、商品やサービスに係る市場が、少数の売り手に支配されている寡占市場において、先に自社製品の価格を優位にシフトさせるインセンティブを決定する企業(リーダー)と、そのインセンティブに基づいて行動を時間的に決定する企業(フォロワー)が存在する誘導戦略モデルである。インセンティブシュタッケルベルグ戦略における均衡論の応用範囲は、多岐に渡っている。太陽光等の再生可能エネルギーを基盤とする電力システムにおいては、上層である電力供給事業者・送配電事業者等の大口発電事業者(リーダー)と下層である小口電力需要家(フォロワー)が参加する売電市場を考えた場合、大規模小口電力需要家の太陽光発電による売電を抑制するインセンティブ、具体的には、日中、太陽光による発電が多い場合には、昼間の売電価格を下げるための負のインセンティブを与えることによって、電力供給のピークカット等、電力需給安定化に利用することが可能である。したがって、大規模複雑化する電力システム等のCPSにおいても、所望の電力需給安定化を実現できるインセンティブ設計が必要不可欠である。

CPSにおける大規模電力システムの電力需給安定化に関する従来研究と比較として、解決しなければならない問題が存在する。CPSでは、大規模複雑な情報構造のために、一般家庭等小口電力需要家単位での局所的かつ不確定情報を前提としているが、どのようにインセンティブの設計に組み込むのか。そもそもインセンティブが存在するのか。さらに、インセンティブによってフォロワーの戦略シフトが可能なのか判定できる理論的研究が存在しない。また、フォロワーをリーダーの要求される協調戦略にシフトさせるインセンティブ獲得に要する大規模最適化アルゴリズムの開発が不十分である。特に、インセンティブ設計に関わる情報制限、インセンティブ可能性、大規模最適化アルゴリズムの開発は、実用面で、最優先に解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に連携可能にするサイバーフィジカルシステム(CPS)におけるロバスト(頑強)大規模インセンティブ設計論について研究する。具体的には、まず、インセンティブの存在性を判別できる「インセンティブ可能性」の概念を創成する。次に、部分観測値や時間遅れ等の不確定情報にロバストな大規模インセンティブ設計問題が、NP困難である非線形行列不等式(Nonlinear Matrix Inequality: NMI)による最適化問題に帰着されることを示す。次に、NP困難さを克服するため、線形行列不等式(Linear Matrix Inequality: LMI)による逐次計算可能な最適化問題に変換し、多項式時間で実行可能かつロバストな収束を達成する高速数値計算アルゴリズムの開発を行う。最後に、再生可能エネルギーに関する電力需給安定化問題を取り上げ、設計された大規模インセンティブ誘導戦略の可用性と高速数値計算アルゴリズムの有用性を実証し、実際の大規模社会システムへの適用可能性に導く。

現在まで、「システム理論」というカテゴリーで、「インセンティブ可能性」という新規概念は存在しない。したがって、どのシステム理論の教科書でも扱われている制御可能性を判別することができる「可制御性」に匹敵する重要な概念となりうる。次に、動的ゲーム理論に基づく協調戦略へ誘導可能なインセンティブ存在条件を非線形行列不等式(NMI)によって定式化を試みる。従来、同種の問題は、NP困難な双線形行列不等式(BMI)による定式化が主であったが、本研究では、インセンティブ設計で利用できる情報構造が不確定なため、独自に、設計パラメータがより多く存在するNMIを利用して最適化問題を定義する。さらに、線形行列不等式(LMI)の逐次計算アルゴリズムの開発によって、大規模な最適化問題でも、実時間でインセンティブを計算可能であることを目指す。



3. 研究の方法

本研究では、解決しなければならない3つの基本的問題に対して、まず、不確定情報にロバストな大規模インセンティブ設計問題をNMIによる最適化問題に帰着させる。次に、NP困難さを克服するため、LMIによる逐次計算可能な最適化問題に変換し、大規模数値計算可能な最適化問題に変換する。その中で、フォロワーの誘導性を判定出来る「インセンティブ可能性」の完全理論構築を行う。その後、大規模非線形最適化問題を解くための高速数値計算アルゴリズムの開発を行う。具体的には、Krasnoselskii mean 不動点アルゴリズム等の収束定理を応用することによって、収束性の保証、計算時間の高速化を目指す。次に、実装に耐えられるかどうか確認するため、フォロワー数 1,000 単位の大規模電力システムを対象にシミュレーションを実行することにより、提案されたインセンティブの可用性と数値計算アルゴリズムの有用性を実証する。

本研究では、CPSのサイバー空間において、高効率化・高信頼化を持続的に実現する新たなロバスト大規模インセンティブ設計のための理論的基盤の構築および、インセンティブ獲得アルゴリズムの確立を目的としている。一般に、社会的厚生を最大化するためには、非協力の状況からインセンティブによって協力状態へシフトさせることが、コスト削減や高効率化を達成させるために重要である。そのため、まず、インセンティブの存在性、並びに可能性について新たな枠組みが必要である。研究代表者は、「インセンティブ可能性 (Incentive possibility)」の概念を初めて提案した。しかしながら、特別なケースにすぎず、実際に利用できるまでの十分な理論的結果が得られていない。したがって、このアイデアをインセンティブの存在性・可能性とともに理論的に再構築する。

現在までに、再生可能エネルギーを模倣した大規模システムに対して、全ての観測値が利用可能な場合、これらの全観測情報に基づくインセンティブの設計は行われてきた。しかしながら、大規模電力システムでは、大口発電事業者、小口電力需要家等、インセンティブ設計に必要な全ての状態を観測・利用することは、物理的に不可能である。さらに、コストがかかり、実用的でない。そこで、インセンティブ設計の基本的概念として、各フォロワーのローカルな観測値のみ利用して、インセンティブを設計する出力フィードバック戦略によるインセンティブ設計がより実践的である。一方、出力フィードバック戦略の構築の欠点は、NMIによる拘束条件を持つ最適化問題を解かなければならないことである。良く知られているように、この問題は、NP困難な問題であり、初期値の設定方法が確立されていないことや、求解アルゴリズムによっては、収束が遅いこと。場合によっては、正確解に到達しないこと等、様々な困難が知られている。以上の観点から、NP困難から多項式時間内に解ける最適化条件の導出、並びに求解アルゴリズムの開発を試みる。

4. 研究成果

2021年度では、サイバーフィジカルシステムをモデル化するにあたり、平均場確率システム

の導入を行った。さらに、大規模インセンティブ設計問題に対して、一般化を行うため、評価関数の凸性の仮定を導入せず、インセンティブ設計に必要な理論構築を行った。また、従来研究と異なり、非線形行列不等式による最適化条件の記述、さらに、インセンティブ存在条件の具体的な定式化に対して、KKT 条件を利用することにより、大規模連立型行列方程式による可解条件導出に成功した。年度後半では、実際の静的出力フィードバック戦略の獲得に関連して、インセンティブが存在するための必要十分条件を新規に導出した。さらに、確率リカッチ・リアプノフ方程式に基づく低次元化可能数値計算アルゴリズムの開発に成功した。

2022 年度は、サイバーフィジカルシステムにおいて、通信遅延等無視できない要素をむだ時間と捉え、静的出力フィードバック戦略に基づく平均場ゲームの導入を行った。まず、サイバーフィジカルシステムを平均場として表現し、平均場ゲーム理論の導入により、誘因戦略の事前結果として、集中制御戦略を導出し、これら戦略の存在条件の定式化を行った。特に、むだ時間が状態ではなく入力に存在する場合、出力フィードバックでは、不可能であること。さらに、状態行列は正方行列でなければならないといったフィジカル空間における拘束条件を確認した。一方、状態のみにむだ時間が存在する場合、サイバー空間での戦略獲得を可能とするため、ニュートン法に基づく計算アルゴリズムの詳細を与えた。さらに、数値解を得るための注意事項について考察を行った。続いて、多数の意思決定者を伴う平均場確率システムに対して、協力ゲームであるパレート最適戦略の適用を行った。最終的に、勾配法による低次元化数値計算アルゴリズムによって得られた再帰的解を、ニュートン法の初期値として利用することにより、より高精度な解を得ることに成功したことを数値例で示した。

2023 年度は、大規模確率システムを基盤としたサイバーフィジカルシステムに対する静的出力フィードバック戦略に基づくインセンティブ設計論を考えた。特に、集中制御を計算するためのニュートン法に基づく計算アルゴリズムの詳細を与え、数値解を得るための可解条件について考察を行った。続いて、対角ブロック構造を持つフィードバックゲインの設計手法を確立した。続いて、多数の意思決定者を伴うサイバーフィジカルシステムに対して、平均場ゲーム理論、並びに協力ゲームであるパレート最適戦略の適用を行った。その他の成果として、集中戦略等の計算を簡略化するために、高近似戦略設計手法の確立を行った。

研究期間全体を通して、インセンティブ可能性を条件式によって定義し、意志決定者数が数百万オーダの実際の社会システムを意識した大規模サイバーフィジカルシステムに対して、所望の戦略及びインセンティブを求めることに成功した。その結果、意志決定者数が限りなく増大しても、計算機の物理的な計算領域の大きさを気にすることなく、戦略並びにインセンティブ設計が行える。さらに、低次元化数値計算アルゴリズムを導出したことにより、正確解を高速かつ安定に求めることが可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sagara Muneomi、Mukaidani Hiroaki	4. 巻 143
2. 論文標題 Sign-Indefinite Linear Quadratic Differential Game for Stochastic Systems via Static Output Feedback Strategy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 38 ~ 46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.143.38	査読の有無 無
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 Mukaidani Hiroaki、Sagara Muneomi、Xu Hua	4. 巻 26
2. 論文標題 Sign indefinite static output feedback Nash strategy for mean field stochastic systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 584 ~ 597
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/asjc.3109	査読の有無 無
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 Irie Shunpei、Mukaidani Hiroaki、Sagara Muneomi	4. 巻 143
2. 論文標題 Mean-Field Games for Time-Delay Stochastic Systems via Static Output Feedback Strategy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 649 ~ 659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.143.649	査読の有無 無
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 Kikuchi Hiroya、Mukaidani Hiroaki、Shima Tadashi	4. 巻 55
2. 論文標題 Pareto Suboptimal Strategy for Uncertain Mean-Field Nonlinear Stochastic Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 127 ~ 132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2022.09.335	査読の有無 無
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 Mukaidani Hiroaki, Irie Shunpei, Xu Hua, Zhuang Weihua	4. 巻 6
2. 論文標題 Robust Incentive Stackelberg Games With a Large Population for Stochastic Mean-Field Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 1934 ~ 1939
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2021.3135754	査読の有無 無
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 Mukaidani Hiroaki, Xu Hua	4. 巻 64
2. 論文標題 Robust SOF Stackelberg game for stochastic LPV systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science China Information Sciences	6. 最初と最後の頁 1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11432-021-3302-5	査読の有無 無
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0件

〔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
---------	---------