

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00034

研究課題名(和文)非負システムにおける誘因シュタッケルベルグ戦略の新展開

研究課題名(英文)A Novel Developments in Incentive Stackelberg Strategy for Positive systems

研究代表者

向谷 博明(Hiroaki, Mukaidani)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：70305788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：確率非負システムに対して、インセンティブシュタッケルベルグゲーム理論に基づく戦略決定問題を扱った。はじめに、環境変動を表現できる確率ノイズ、及びモデル化誤差を表現できる確定入力外乱を考慮し、伊藤の確率微分方程式に基づく多プレーヤ確率非線形非負システムモデルを提案した。引き続き、 H^{∞} 制御理論によるインセンティブシュタッケルベルグゲームの均衡戦略構築に成功した。その他、下位層では、パレート準最適性、ナッシュ均衡論による比較検討も行った。その後、出力フィードバック問題を扱った。その結果、所望の均衡状態へ少ない情報量で下位層にいるフォロワーを上位層のリーダーの決定戦略に誘引することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案された戦略設計手法は、従来にある2点境界値問題を解く必要がない。また、凸最適化手法を基盤とする線形行列不等式による繰返し数値計算アルゴリズムによって、容易に戦略設計が可能である。さらに、実際の非負システムへ適用するため、不確定要素を考慮した確率システムに対する戦略設計を提案した。特に、実用性を示すために、非負システムにおける重要な課題として知られるSIR感染モデルでのワクチン接種戦略決定を扱った。その結果、数値戦略解を得ることに成功した。これは、感染者人口の現時刻情報に基づく局所的な状態値のみによって、ワクチン接種戦略設計が行える点で、理論的かつ非常に実用的な結果であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The decision making problem based on the incentive Stackelberg game for a class of stochastic positive system was dealt with. First, a multi-player stochastic nonlinear positive system model governed by Ito's stochastic differential equation has been proposed by considering the stochastic noise that can represent the environmental fluctuations and deterministic input disturbance that can represent modeling error. Then, we have succeeded in designing the equilibrium strategy of the incentive Stackelberg game by H^{∞} control theory. In addition, Pareto suboptimality strategy and Nash equilibrium strategy were used for comparison in the lower layer. In the sequel, the static output feedback strategy set was addressed. As a result, it has been shown that it was possible to induce the follower in the lower layer to the desired equilibrium point in terms of the strategy of the leader in the upper layer with a constrained state information.

研究分野：システム理論

キーワード：インセンティブシュタッケルベルグゲーム 非負システム 確率システム パレート準最適性 ナッシュ均衡戦略

1. 研究開始当初の背景

非負システムとは、微分方程式の解が常に非負値になるという性質を有するシステムである。このような非負性は、資源量、エネルギー量や個体数といった“負の値を取り得ない物理量”のやりとりを表すダイナミクスにおいて、自然界に現れる。非負システム理論は、経済学・工学・生物学といった多彩な応用分野で重要な研究対象になっている。

一方、時間依存する動的システムにおいて、複数プレーヤが関わる状況下、個々の意思決定を行う手法として、動的ゲーム理論(微分ゲーム理論)が良く知られている。特に、非協力ゲーム型階層戦略として、シュタッケルベルグ戦略が有名である。シュタッケルベルグ戦略は、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決定する企業(リーダー)と、その情報を知った上で価格を設定する企業(フォロワー)が存在する戦略モデルである。シュタッケルベルグ戦略における均衡論の応用範囲は、経営戦略決定や政策決定など多岐に渡っている。

実際の微分ゲームの応用例として、湖沼のアオコ(緑色の藻の一種)の抑制問題を考えた場合、従来研究の結果によれば、抑制戦略が非線形偏微分方程式として有名なハミルトン-ヤコビ方程式を解くことによって得られることが知られている。実際、得られたハミルトン-ヤコビ方程式を2次元差分方程式化して、数値計算によって戦略解を求めることが可能である。しかしながら、従来研究では、アオコの濃度が正の値しか取らないにも関わらず、(1)非負システムとして扱っていない。さらに、(2)アオコの抑制戦略を決定するリーダー(政府)と、行動手段のフォロワー(民間)の二階層で考えることが望ましいにもかかわらず、一階層のナッシュ均衡戦略のみしか考慮されていない。その上、(3)戦略決定のために解く必要のあるハミルトン-ヤコビ方程式の解が、非常に短期間である3日ですら数値解は発散し、事実上、使用に耐えうる結果にほど遠い等の欠点が出てきた。

ところで、シュタッケルベルグ戦略でも、リーダーの趣向に誘因可能な戦略を柱とした非協力誘因階層戦略は、誘因シュタッケルベルグ戦略とよばれる。誘因シュタッケルベルグ戦略は、現実の政策決定として採用されるようになり、応用が注目されている。しかし、非負システムに対する誘因シュタッケルベルグ戦略の獲得に関する研究は、現在のところ国内外を問わず全く行われていない。さらに、ブラウン運動によるノイズを伴う確率非負システムの応用は、その高い汎用性にもかかわらず、全く手付かずの状態である。先のアオコの抑制問題に見られるように、階層型シュタッケルベルグゲームにリーダーの誘因戦略を備えることは、実用化において最重要課題である。

2. 研究の目的

本研究では、先の(1)~(3)の問題に対し、非負システムにおける階層型複数プレーヤを仮定した非協力誘因階層戦略 - 誘因シュタッケルベルグ戦略 - 獲得を目的とする。さらに、戦略獲得に関する大規模非線形偏微分方程式を解くための数値計算アルゴリズムの開発を行い、その有用性をシミュレーションによって示す。具体的には、非負システムを対象として、非協力誘因階層戦略が存在するための必要十分条件を非線形偏微分方程式で有名なハミルトン-ヤコビ方程式によって記述する。さらに、このハミルトン-ヤコビ方程式を数値的に解くための数値計算アルゴリズムを確立する。特に、過去の研究結果の飛躍的拡張を狙い、解の広範囲な空間領域、および年単位での長時間領域のシミュレーションを実行可能にする高精度差分型数値計算アルゴリズムの開発を行う。最終的に、更なる一般化を目指し、非負システムに伊藤の確率微分方程式を融合した確率非負システムに対しても、誘因シュタッケルベルグ戦略の理論的構築を行い、現実問題への適用可能性へ導く。

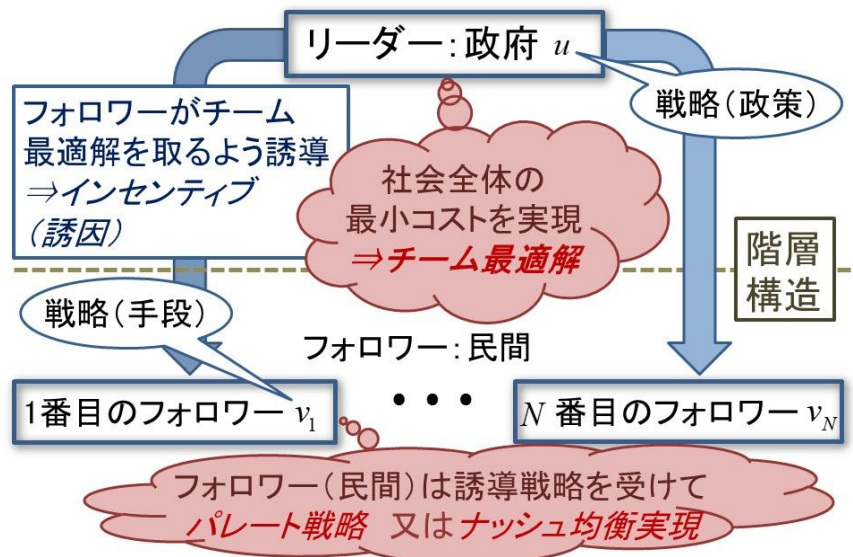


図1: 非負システム誘因シュタッケルベルグ戦略の概略図

3. 研究の方法

初年度では、まず、文献調査として、モデル化誤差やパラメータ変動等の確定外乱を含む連続時間非線形大規模非負システムに対し、シュタッケルベルグゲームに基づく階層型誘因戦略の導出準備として、単一層での非協力ゲームにおけるナッシュ均衡戦略が導出可能かどうか調査を行う。さらに、大規模非線形偏微分方程式の解の振る舞いを予め掌握するため、近似解を用意する。すなわち、線形システムに基づく近似戦略の導出を目指す。特に、戦略を得るために解く必要がある大規模連立型代数行列方程式だけでなく、線形行列不等式による十分条件の導出が出来るかどうか調査を行う。最後に、実際の非負システムを対象として、シミュレーションが行えるように、準備を行う。

2年目においては、 H_2 ノルム制約をもつ大規模非線形非負システムのためのナッシュ均衡戦略問題を扱う。ここで、通常のナッシュ均衡戦略と異なり、最大化における均衡状態を仮定して、評価関数における各プレーヤの制御入力に関する2次項の符号は負であることに注意が必要である。一方、非負システムに現れる非線形項を線形化した後、線形時不変非負システムに関して、戦略が存在するための条件を導出する。特に、線形化によって生じる確定的モデル化誤差の影響を、 H_2 制御理論を適用して、外乱から制御量の影響を低減させることを考える。その他に、拡張として、ナッシュ均衡戦略を構築するにあたり、完全状態フィードバック戦略を考える。この問題に対して、閉ループナッシュ均衡戦略の存在を保証する条件を連立型代数行列方程式の可解条件として定式化を行い、さらに、これらの条件を、線形行列不等式の観点から再定式化を行う。後に、大規模システムである非負協調システムの平衡点の存在を保証する条件の導出を行う。

最終年度は、非負システムにおける新戦略獲得に向け、最適制御理論に基づく安定化制御問題に特化し、誘因型階層戦略である誘因シュタッケルベルグゲーム理論を応用した平衡点への収束条件導出を行う。さらに、戦略を計算するための数値計算アルゴリズムの開発も行う。同時に、シミュレーションの状態空間と時間軸が大きいことから、年単位での長時間領域のシミュレーションを実行可能にする高精度差分型数値計算アルゴリズムの開発を行う。これらの結果から、現実問題への適用可能性を示す。

4. 研究成果

非負システムにおける動的ゲーム問題の結果として、複数のプレーヤを伴う非線形大規模非負システムを扱った。まず、動作均衡点近傍での線形近似を行った後、非線形モデル化誤差の部分を微小不確定要素とみなし、 H_2 制御理論によって、外乱抑制のための十分条件を線形行列不等式によって導出を行った。一方、線形部分においては、各プレーヤにおける評価関数の均衡状態を仮定し、ナッシュ均衡条件が成立するための関係式を、大規模連立型代数行列方程式の可解条件によって表現を行った。以上より、これらの十分条件を満足する解の組が存在すれば、非線形非負システムであっても、線形システムの設計手法によって、ロバストな戦略設計が可能となり、初期段階でのシミュレーションが実施可能となった。一方、同様の問題に対して、開ループナッシュ均衡戦略の導出も行った。同時に、各プレーヤの協力が仮定される場合を想定し、パレート最適戦略の導出も行った。最後に、提案されたナッシュ均衡戦略集合の存在性を説明するために、非負システムの応用例として、簡単なニューラルネットワークモデルを考えた。ニューラルネットワーク基盤とした非負システムに対して、ナッシュ均衡戦略およびパレート最適戦略の両方の戦略集合を数値的に求めた。シミュレーションでは、Cohen-Grossberg Neural Networks に対して、安定性が保証されることが確認された。これらの結果は、非負システムの国際会議では唯一である The 6th Int. Conf. Positive Systems (2018 POSTA)、および 12th Asian Control Conf. (2019 ASCC)において発表された。

一方、アオコの抑制問題に見られるように、複数制御エリア内の観測出力情報並びに制御エリア近傍にいるプレーヤ間の完全観測情報に基づく状態フィードバック制御では、遅れを伴う周囲からの情報、並びに感染情報等の状態値の取得が成功の鍵となることが知られている。そこで、動的ゲーム理論に基づく確率安定化制御問題について、遅延型静的出力フィードバックによる制御則構築を基盤とするむだ時間大規模システムの制御設計に注目した。戦略導出では、まず、実システムにおける制御用コンピュータの利用限界、観測情報の遅延等の選択拘束を考慮し、現実問題に適用可能な凸最適化問題の設定を行った。その後、確率マルコフモデルや、確率線形パラメータ変動システムモデルを導入し、劇的な環境変動によるモデル変化を数理モデルとして定式化しつつ、さらに、確定的モデル不確実性を考慮したロバストな合意形成制御の存在問題を線形行列不等式による数値最適化問題に帰着させることに成功した。引き続き、部分的な状態値、及び情報遅延を伴う数理モデルに対して、確率リアプノフの安定性理論、及び誘因シュタッケルベルグゲーム理論の優位な特徴を考慮し、安定化可能な均衡状態への誘導条件の導出も行った。後に、提案された戦略集合の有用性の比較検討を行うために、ある一定の条件を満足すれば、均衡状態に誘導することが可能であることが証明された。これらの一部結果は、制御理論のフラグシップ国際会議である 58th IEEE Conf. Decision and Control, 2019 で発表された。

本研究で得られた環境変動にロバストな確率システムの戦略提案のみならず、誘因シュタッケルベルグ均衡戦略を得るために解く必要のある超大規模連立非線形行列方程式を解くための

数値計算アルゴリズムの開発，及び，収束性や収束速度の解明に成功している．その結果，高精度な解を高速に求めることが可能となった．また，従来研究と比較して，二点境界値問題を解く必要もなく，凸最適化問題を繰り返し解くだけで，誘因シュタッケルベルグゲーム戦略を得ることが可能であることが確認された．これらは，研究当初に想定されていたハミルトン-ヤコビ方程式を解くことを回避し，違った観点で，大規模・長時間でのシミュレーションの実行可能性を示した．特に，今後の応用展開を想定し，かつ，アオコの抑制制御問題より制御期間が短い実務的な重要課題として，SIR(感染)モデルでのワクチン接種戦略決定問題の考察を行った．SIRモデルとは，感染症の短期的な流行過程を決定論的に記述するモデルのことである．特に，SIRの頭文字を表す感受性保持者(S)・感染者(I)・免疫保持者(R)のうち，観測可能な感染者人口の現時刻情報に基づく局所的な状態値のみをワクチン接種戦略に利用することを想定した．さらに，感染制御者は複数存在し，これらが下位層を形成すると設定した．さらに，協力戦略であるパレート準最適戦略を選択すると仮定を行った．一方，感染時間遅れを伴う非線形むだ時間確率数理モデルを基盤として，凸最適化問題への定式化も行った．ここでは，むだ時間リアプノフの安定性理論によって，ワクチン接種戦略を，誘因シュタッケルベルグゲーム理論の誘因性，すなわち感染を収束させるようなインセンティブを經由して設計を行った．これらの提案されたワクチン接種戦略の顕著な利点は，非負の変数であっても，所望の均衡状態へ観測可能な遅延情報だけ利用して，誘導することができることである．これらの結果は現在投稿中である．

その後，拡張として，マルコフ(Markov)モデルや，線形パラメータ変動システムモデルを駆使した静的出力フィードバックによる階層戦略であるシュタッケルベルグ均衡戦略の構築にも成功している(57th IEEE Conf. Decision and Control, 2018, IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics, 2018 で一部発表)．特に，単一階層でのパレート準最適戦略やナッシュ均衡戦略のみならず，階層戦略である誘因シュタッケルベルグ戦略の理論構築が完了している点は，実システムへの適用へのハードルを下げるという意味で非常に評価できると考えられる．実際，非負システムの代表格の一つであるニューラルネットワークへの適用以外，本研究のシミュレーションでは，感染モデルに対するワクチン接種戦略の構築問題(投稿中)，大規模化学プラントの生成物濃度制御戦略決定問題(投稿中)や，TCP/IP ネットワークに基づく輻輳制御問題(国際会議 2019 58th Annual Conf. SICE で発表)に対して，戦略が得られた．また，シミュレーションによって，有用性が確認された．特に，SIR 感染モデルに対するワクチン接種戦略が，ハミルトン-ヤコビ方程式を解く必要がなく，さらに従来研究と異なり，二点境界値問題も扱う必要がなくなった．その結果，非常に簡単に戦略集合を得ることが可能となった．これは，当初の研究計画にはなかった実用面で非常にユニークな結果である．

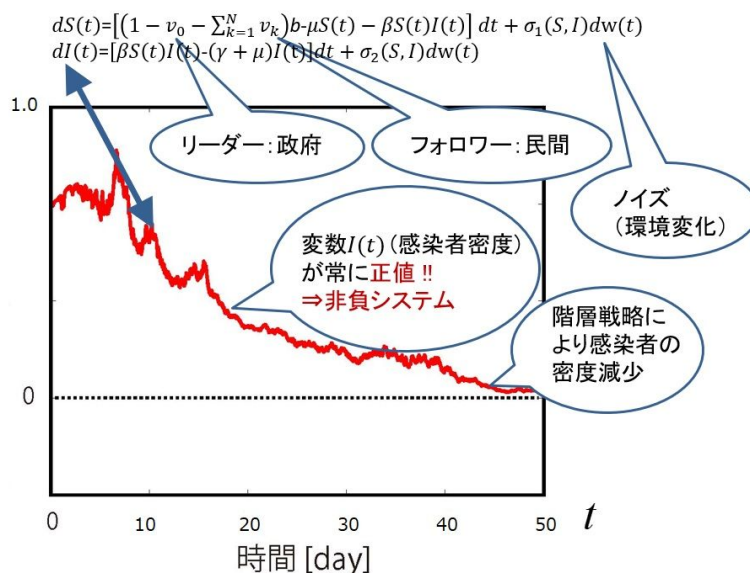


図2: 確率非負システム(SIR感染モデルの感染者抑制制御)の例

SIR 感染システムのシミュレーションでは，大規模性を克服するために，GPU を搭載したワークステーションの利用を試みている．具体的には，機械学習の利用により，現実により即した大規模シミュレーションが高速かつ忠実に行えるように，畳み込みニューラルネットワークの導入を検討した．

以上より，非常に多くの有用な理論的結果，並びに関連する数値計算技術の獲得が行われている点で，十分な成果を得ることに成功したと判断される．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroaki Mukaidani, Ramasamy Saravanakumar, Hua Xu	4. 巻 14
2. 論文標題 Robust Incentive Stackelberg Strategy for Markov Jump Linear Stochastic Systems via Static Output Feedback	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IET Control Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 1246-1254
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/iet-cta.2019.0917	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Mostak Ahmed, Hiroaki Mukaidani, Tadashi Shima	4. 巻 11
2. 論文標題 H _∞ -Constrained Incentive Stackelberg Games for Discrete-Time Stochastic Systems with Multiple Followers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IET Control Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 2475 ~ 2485
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/iet-cta.2017.0105	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 Robust Nash Static Output Feedback Strategy for Uncertain Markov Jump Delay Stochastic Systems
3. 学会等名 58th IEEE Conf. Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 H _∞ Constraint Pareto Suboptimal Static Output Feedback Strategy for Uncertain Markov Jump Linear Stochastic Systems, 2019 American Control Conf
3. 学会等名 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 Robust Nash Strategy for Uncertain Delay Systems with LSTM
3. 学会等名 58th Annual Conference of the SICE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 Nonlinear Model Predictive Congestion Control Based on LSTM for Active Queue Management in TCP Network
3. 学会等名 Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 Open-Loop Dynamic Games for Interconnected Positive Nonlinear Systems with H_∞ Constraint
3. 学会等名 Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 Closed-Loop Nash Games for Interconnected Positive Nonlinear Systems with H_∞ Constraint
3. 学会等名 The 6th International Conference on Positive Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 Robust Incentive Stackelberg Games for Stochastic LPV Systems
3. 学会等名 57th IEEE Conf. Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroaki Mukaidani
2. 発表標題 Incentive Stackelberg-Nash Strategy with Disturbance Attenuation for Stochastic LPV Systems
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Hiroaki Mukaidani and Hua Xu	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 10
3. 書名 Positive Systems: Theory and Applications	

1. 著者名 Hiroaki Mukaidani	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 78
3. 書名 Frontiers in Games and Dynamic Games	

〔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
研究 協力 者	莊 衛華 (Zhuang Weihua)	ウォータールー大学・Professor	