

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04117

研究課題名(和文)非協調・非協力動的システムの動的システム科学と制御

研究課題名(英文)Control Framework for Noncooperative Dynamical Systems

研究代表者

早川 朋久 (Tomohisa, Hayakawa)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：30432008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ネットワーク化されている社会・経済的システム全体の時間的進展を制御工学・力学系の観点から解析していく。特にゲーム理論的均衡構造と情報交換構造の階層化を端緒にして、ネットワーク化された現代の急速なデジタル化社会を見据え、これまでの制御工学ではほとんど考慮されてこなかった個別の利得最大化問題と、総体の利益の最大化との関係を定量化し、不完全情報下で合理的・非合理的選択、平衡状態やその分岐、安定性、フィードバック結合等を解析していくことで、静学的ゲームでは見出せない現象を探り、人間と社会の行動原理を解明し制御していく基礎論を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで人間の戦略的行動選択と情報の関係性を扱った社会学的・経済学的システムにおいて、メモリの概念を導入し、特徴的な「情報の非対称性」を陽に考慮し、動的システムモデルの構築・解析とそのモデルにおける戦略立案の手法を開発したところにある。特に、従来のゲーム理論を動的システムとしてそれぞれ静的モデルとの類似性を同定し、これまでのマルチエージェント理論で得られている知見を適用可能にした。また、動的ネットワークモデルに対して制御則を陽に導出し定式化することにより、ミクロ的振る舞いである戦略的行動をマクロモデルの中で特徴付け、ミクロとマクロモデルの融合問題に対する制御論的解釈を提示することができる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we analyze the temporal evolution of entire networked social and economic systems from the perspective of control engineering and dynamical systems. In particular, starting from the game-theoretic equilibrium structure and the hierarchical structure of information exchange, we quantify the relationship between the individual gain maximization problem and the maximization of aggregate profit, which has rarely been considered in control engineering to date, and analyze rational and irrational choices under imperfect information, equilibrium states and their bifurcations, stability, feedback coupling, and so on. By analyzing equilibrium states and their bifurcations, and stability properties, we have explored phenomena that cannot be found in static games, and established a fundamental theory for clarifying the principles of human and social behavior.

研究分野：制御工学

キーワード：非協力・非協調マルチエージェントシステム 制御理論応用 ゲーム理論 戦略的行動選択

1. 研究開始当初の背景

(1) デジタル化が急速に進展している現代の社会においては、人間の考え方やその特性を陽に考慮した社会システムの構築と制御が求められている。そこには人間の利己的振る舞いやゲーム的要素など、個々の行動主体(ミクロ)の振る舞いとその集合体(マクロ)としての振る舞いは物理現象と決定的に異なり、動学的システムとして扱うには相当の工夫を必要とする要素が存在する。

(2) 数理社会学・経済学の分野では、取り扱う対象として非常に多くの場合静学的なシステムを考えている。ゲーム理論では、進化ゲームや微分ゲームは動的計画法と原理的に親和性が高く、制御理論の分野でも1970年代から研究が報告されているが、人間行動/社会活動の定性的・定量的評価と関連づけたものは極端に少ない。進化ゲームにしても、レプリケータ力学系に代表されるマクロな意味での population dynamics としての動特性は解析されているが、人間の意思・評価値といった decision making に係わる要素はモデルに反映されていない。さらに、繰り返しゲームといった、一見時間を陽に考慮していると考えられるモデルでも、単なる静的ゲームの繰り返しであり、過去の状態や情報が「慣性を持って」未来の状態に影響を及ぼす「メモリ」の要素を考慮していない点でも、我々制御理論家の考える動学的システムとは本質的に異なる。

(3) 近年制御理論の分野ではマルチエージェントシステムとネットワークシステムの制御研究が非常に盛んである。マルチエージェントシステムの分野では特に合意問題・被覆問題と呼ばれる協調制御が中心的話題となり、ネットワークシステムの分野では大規模システムの低次元化やクラスタリングといった内容が主である。いずれの分野でもグラフ理論が多用されているが、対象は抽象的な存在としての「主体」や電力ネットワークなどの物理システムであることが多く、電力料金のプライシング計画等の人間の評価値を陽に考慮した問題は、やっとここ最近扱われ始めてきたところである。言うまでもなく、人間の戦略的行動選択をミクロな意味で動的に特徴付ける取り組みはほとんどなされていないといってよい。つまり、我々の社会活動において、平衡点が定義される状況はなにか、景気変動のような周期解が存在する理由はなにか、情報の欠落・不確かさ・非対称性がある場合の戦略行動の末にどのような現象が起きるのか、これまでの経済学・社会学の枠組みでは動学的にほとんど説明されていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究ではネットワークをキーワードに高度情報化社会(デジタル社会)としての社会システムを動的システムとして取り上げ、制御論的手法・知見を駆使しながら、戦略的行動選択をとる人間/社会ネットワークの定性的・定量的解析とシステム設計の基礎を作り、個々の振る舞いを見ているだけでは気づかない人間と社会の行動原理の発見に貢献する基礎論を確立する。

3. 研究の方法

(1) これまで人間の戦略的行動選択と情報の関係を扱った社会学的・経済学的システムにおいて、メモリの概念を導入し、特徴的な「情報の非対称性」を陽に考慮し、動的システムモデルの構築・解析とそのモデルにおける戦略立案(インセンティブ設計=メカニズムデザイン)の手法を開発するところにある。特に、従来のゲーム理論は主に静的な枠組みモデルの中で議論されてきたが、これらを動的システムとしてそれぞれ静的モデルとの類似性を同定し、これまでのネットワーク・マルチエージェント理論で得られている知見を適用可能にする。また、マクロ的モデルとして想定される動的ネットワークモデルに対して制御則を陽に導出し定式化することにより、個々のエージェントのミクロ的振る舞いである戦略的行動をマクロモデルの中で特徴付け、ミクロモデルとマクロモデルの融合問題に対する確率論的・制御論的解釈を提示する端緒にしていく。

4. 研究成果

(1) 持続性のある税・補助金をもちいた非協調マルチエージェントシステムの制御非協力的力学系のナッシュ均衡安定化問題を税・補助金アプローチにより研究した。この税・補助金アプローチでは、システム管理者が一部のエージェントから税金を徴収し、それと同額を補助金として近隣のエージェントに交付する。私的情報の不確実性に対処するため、私的情報を知らない場合のナッシュ均衡の安定条件を探索し、インセンティブ関数を用いて状態軌道が本来不安定なナッシュ均衡に収束する条件を求めた。また、2エージェントおよび5エージェントの非協力システムにおいて、不安定なナッシュ均衡が安定化することを示す数値例を示した。エージェントの利己的行動の分析と安定化については、まだいくつかの未解決の問題が残っており、例えば、近視眼的擬似勾配ダイナミクスと最良応答ダイナミクスを組み合わせたダイナミクスにおける状態ジャンプ、擬似勾配ダイナミクスにおける認知階層とリスク回避行動、エージェント数が未知で通信リンクが時変する場合の安定化、ペイオフ依存関係の階層構造、悪意のある攻撃者がいる場合のセキュリティ問題などは今後の重要な研究対象となる。

(2) パレート改善を保証するインセンティブ設計について

疑似勾配に基づく非協力的力学系に対して、重み付き社会厚生を改善し、継続的なパレート改善を達成するためのパレート改善インセンティブメカニズムを開発した。提案手法では、システム管理者は、持続可能な予算制約の下で、一部のエージェントから税金を徴収し、徴収した税金の一部を補助金として他のエージェントに与えることで、エージェントの動的意思決定を修正する。エージェントの状態が、エージェントの優先順位比と初期状態に依存する重み付き社会厚生関数に関連する社会的に最大な状態に収束する十分条件が導出される。いくつかの数値例を用いて我々の結果の有効性を説明するとともに、ペイオフ構造のポテンシャル化がパレート改善システムの軌道生成と非常に強い関係があることを明らかにした。

(3) プロスペクト理論の発想を取り入れたマルチエージェントシステムの安定解析について

プロスペクト理論に基づいて、疑似勾配ダイナミクスのもとで各エージェントがペイオフが減少するときにより低い感度を示す場合を想定して、フラッシュスイッチング現象の概念を特徴付け、3つのケースについてナッシュ均衡の位置に応じた安定性を調べた。その結果、感度パラメータがシステムの安定性にどのような影響を与えるかを、3つのケースそれぞれのダイナミクス、状態空間の分割、モード遷移、正規化半径成長率の観点から明らかにした。その結果、プロスペクト理論における心理的考察に着想を得た損失回避行動が、ナッシュ均衡の安定性を安定から不安定に変化させる可能性があることが示された。

(4) 階層型非協調マルチエージェントシステムの制御について

階層的な非協力システムという特徴的な枠組みにおいて、エージェントはグループ内のインセンティブの下で利己的に意思決定を行う。我々は、動的なエージェントを含む階層的な非協力システムの集団ナッシュ均衡の安定性を探索し、その安定性を示す条件を導出した。また、グループ内インセンティブの下で、エージェントの状態がグループナッシュ均衡に収束する条件を導出した。さらに、社会厚生を向上させるために、グループ管理者レベルでグループ効用関数を再構築し、グループナッシュ均衡に移行させるためのシステムガバナーに対するグループ間インセンティブメカニズムを提案した。さらに、システムガバナーが全エージェントの個別ペイオフ関数と全エージェントの状態を把握していない可能性がある状況に対処するため、マクロ的なデータを用いてエージェントの状態が目標均衡に収束することを保証する十分条件を示した。本研究では、システムガバナーが各グループから1次元のデータを得られると仮定しても、システムガバナーにとってより豊富な(高次元の)情報が得られる場合には、目標均衡を評価したときに、より高い厚生状態が得られることが示される。最後に、4エージェントおよび60エージェントの階層的な非協力システムにおいて、グループナッシュ均衡の安定性と安定化を示す3つの数値例を示した。今後取り組むべき内容として、時変ペイオフ依存性や認知階層を考慮したインセンティブ設計、エージェントのグループ所属問題、エージェント層に悪意のある攻撃者が存在する場合のセキュリティ問題などが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yan Yuyue, Hayakawa Tomohisa	4. 巻 11
2. 論文標題 Hierarchical Noncooperative Dynamical Systems Under Intragroup and Intergroup Incentives	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 743 ~ 755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCNS.2023.3242359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Cetinkaya Ahmet, Ishii Hideaki, Hayakawa Tomohisa	4. 巻 68
2. 論文標題 Effects of Jamming Attacks on Wireless Networked Control Systems Under Disturbance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1223 ~ 1230
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2022.3153275	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 -

1. 著者名 Nugraha Yurid, Cetinkaya Ahmet, Hayakawa Tomohisa, Ishii Hideaki, Zhu Quanyan	4. 巻 68
2. 論文標題 Rolling horizon games of resilient networks with non-uniform horizons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Control	6. 最初と最後の頁 100693 ~ 100693
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ejcon.2022.100693	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 -

1. 著者名 Cetinkaya Ahmet, Ishii Hideaki, Hayakawa Tomohisa	4. 巻 68
2. 論文標題 Effects of Jamming Attacks on Wireless Networked Control Systems Under Disturbance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1223 ~ 1230
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2022.3153275	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 -

1. 著者名 Yan Yuyue, Hayakawa Tomohisa	4. 巻 67
2. 論文標題 Stability Analysis of Nash Equilibrium for Two-Agent Loss-Aversion-Based Noncooperative Switched Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 2505 ~ 2513
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2021.3079276	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 -

1. 著者名 Yan Yuyue, Hayakawa Tomohisa	4. 巻 52
2. 論文標題 Stability and Stabilization of Nash Equilibrium for Uncertain Noncooperative Dynamical Systems With Zero-Sum Tax/Subsidy Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cybernetics	6. 最初と最後の頁 11287 ~ 11298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCYB.2022.3154109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yan Yuyue, Hayakawa Tomohisa	4. 巻 -
2. 論文標題 Pareto-Improving Incentive Mechanism for Noncooperative Dynamical Systems Under Sustainable Budget Constraint	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2023.3325412	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Bakibillah A.S.M., Kamal M.A.S., Tan Chee Pin, Hayakawa Tomohisa, Imura Jun-ichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Optimal eco-driving scheme for reducing energy consumption and carbon emissions on curved roads	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e23586 ~ e23586
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.heliyon.2023.e23586	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11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Tomohisa Hayakawa, Masato Kigoshi
2. 発表標題 Supply/demand analysis in ``colored`` hydrogen transactions and potential for carbon neutrality
3. 学会等名 AHFE International Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yan Yuyue, Hayakawa Tomohisa
2. 発表標題 Pseudo-gradient dynamics with Level-k predictions in noncooperative dynamical systems
3. 学会等名 IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nugraha Yurid, Cetinkaya Ahmet, Hayakawa Tomohisa, Ishii Hideaki, Zhu Quanyan
2. 発表標題 Rolling horizon games of resilient networks with non-uniform horizons
3. 学会等名 European Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yan Yuyue, Hayakawa Tomohisa
2. 発表標題 Pareto Improving Incentive Mechanism for Noncooperative Dynamical Systems Under Sustainable Budget Constraint
3. 学会等名 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T Tanaka, Yasuaki Wasa, Tomohisa Hayakawa
2. 発表標題 Equilibrium seeking in two-agent non-cooperative dynamic game with asymmetric horizon length
3. 学会等名 Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yan Yuyue, Hayakawa Tomohisa
2. 発表標題 Pareto Improving Incentive Mechanism for Noncooperative Dynamical Systems Under Sustainable Budget Constraint
3. 学会等名 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nugraha, A. Cetinkaya, T. Hayakawa, H. Ishii, and Q. Zhu
2. 発表標題 Rolling horizon games of resilient networks with non-uniform horizons
3. 学会等名 European Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nugraha, A. Cetinkaya, T. Hayakawa, H. Ishii, and Q. Zhu
2. 発表標題 Two-player incomplete games of resilient multiagent systems
3. 学会等名 IFAC World Congress
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Z. Guo, T. Hayakawa, and Y. Yan
2. 発表標題 The Nash equilibrium of 2-agent game with quadratic vector payoff functions and its stability
3. 学会等名 IFAC World Congress
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Z. Guo, T. Hayakawa, and Y. Yan
2. 発表標題 Stability and stabilization of Nash equilibrium for noncooperative systems with vector-valued payoff functions
3. 学会等名 IEEE Conference on Decision and Control
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Z. Guo and T. Hayakawa
2. 発表標題 Topology of Nash equilibrium set with quadratic vector payoff functions
3. 学会等名 American Control Conference
4. 発表年 2024年

〔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
---------	---------