

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 6 年 6 月 1 8 日現在

機関番号：3 4 4 2 8

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019 ~ 2023

課題番号：1 9 K 0 4 4 4 0

研究課題名 (和文) 非協力・利己的マルチエージェント系のための制御エージェント設計

研究課題名 (英文) Control Agent Design for Noncooperative Selfish Multiagent Systems

研究代表者

金澤 尚史 (Kanazawa, Takafumi)

摂南大学・理工学部・准教授

研究者番号：9 0 4 5 2 4 1 6

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) : 本研究の目的は、相互作用が非協力ゲームとしてモデル化されたエージェント集団からなるシステムにおいて、全体の目的を相互作用を通じて実現する「制御エージェント」の設計法を確立することである。まず、多数のエージェントが複数のタスクを協力して実行する際に、自律的・利己的に実行するタスクを決定することで最適なタスク割当を実現する手法を提案し、動的領域被覆と目標追跡を両立するセンシングネットワークの設計に応用した。さらに、各エージェントが価値観の違いを認識できない状況において、目標状態を実現するための補助金配分法を提案し、経路と出発時間を同時に選択する利己的ルーティングの制御に応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報技術やAIの発展に伴って単独で知的な振る舞いが可能な自律エージェントの活躍の場が広がっている一方で、複数のエージェントの協調的な振る舞いの設計の重要度はますます高まっている。本研究は、自律分散的に大規模な問題を解決する人工的なエージェントの設計法の提案という意味で、この問題に取り組むものである。また、システムが大型化・複雑化する中で、管理者がその行動を直接制御できないエージェントが利己的に振る舞ったとしても、全体として望ましい状態を実現するための (税や補助金を用いた) 間接的な制御理論は、工学的な問題のみならず社会的な問題へも応用可能性を持つ発展性の高いものである。

研究成果の概要 (英文) : This research introduces a design method of control agents that realize the total purpose of whole system in noncooperative games with many selfish agents. In the case where many agents handle multiple tasks cooperatively, we propose an agent-based task allocation method. In the method, selecting tasks selfishly, agents can find optimal task allocation autonomously. The task allocation method is also applied to sensing networks that solve both dynamic coverage and target tracking. A subsidy allocation method is introduced to realize the target state in the case where the agents cannot recognize the difference in values among them. The subsidy allocation method is also applied to control selfish routing with departure time selection.

研究分野：システム工学

キーワード：システム工学 制御工学 マルチエージェントシステム 集団ゲーム 非協力ゲーム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

これまでマルチエージェント系の制御問題としては、局所的な情報交換をもとに全体としてあるタスクを分散的に達成する協調制御と呼ばれる問題が幅広く扱われている。協調制御では、各エージェントが自身のもつ局所的な情報のみで意思決定する必要があるため、結果的に協調的に振る舞うエージェントの利得関数や学習規則の設計に対して非協力ゲーム理論の結果が応用されている。しかしながらこれは、エージェントが設計されるものという前提で扱われる問題であり、社会システムや利己的なエージェントが関わる工学的なシステムなどに見られる本来の意味での非協力・利己的マルチエージェント系の制御について取り扱われているわけではない。近年、工学的・社会的を問わず、システムが大型化・複雑化する中で、管理者がその行動を直接制御できないエージェントが利己的に振る舞ったとしても、全体として望ましい状態を実現するための利己的マルチエージェント系の制御理論の重要性は今後ますます高まっていくと考えられる。

一方で、利己的なエージェント集団からなる社会システムにおいては、エージェントの平均利得を最大化する状態が必ずしも実現されないという問題が古くから社会ジレンマとして知られており、ゲーム理論を用いたモデル化とジレンマの解消法が提案されている。代表的な手法は、各戦略に対して、その戦略を選択することで他者に与える悪影響を税として課す手法である。この手法を用いることで、エージェントの平均利得を(局所)最大化できる一方で、エージェントの利得の公平化など、それ以外の目的を実現することはできないという問題がある。

このため申請者は、税と補助金を用いて、利己的マルチエージェント系においてあらかじめ定めた目標状態を安定化する制御法について研究を行ってきた。この手法では、特にすべての集団の状態が観測可能な場合には、各エージェントに適切な補助金を配分することで、マルチエージェント系に対して一種の状態フィードバック系を構成可能であり、制御理論の知見を活用することで与えられた任意の目標状態が安定化可能である。しかしながら、各エージェントの利得が観測できない場合や異なる性質を持つエージェント間で行動の模倣が行われる場合などには、補助金のダイナミクスに与える影響が複雑化するため、いまだ制御系の設計法について十分な議論がなされていない。

そこで、ゲーム理論的な知見に基づいて、大規模システムを非協力・利己的な相互作用によって制御する制御エージェントの設計法の確立と、すでに存在する非協力・利己的エージェント集団の相互作用に介入して目標状態を実現する制御法の確立はともに重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、相互作用が非協力ゲームとしてモデル化された複数の非協力で利己的なエージェント集団からなるシステムにおいて、システム全体の目的をエージェント集団の相互作用を通じて実現する「制御エージェント」の設計法を確立することである。

まず、多数のエージェントが、エージェント数に対して比較的少数のタスクを協力・分担して実行する状況を考え、タスクの性質とエージェントの能力の違いを考慮したタスク割当問題について検討する。エージェント数が多い場合、独立した制御器(タスクマネージャ)が各エージェントのタスクを決定し割り当てるのは現実的ではない。そこで、大域的な評価関数を用いて各エージェントの利得関数を設計し、集団ゲームの知見に基づいて、相互作用しながら自律的にタスクを選択することで大域的に最適なタスク割当を実現する制御エージェントの設計法を提案する。また、このタスク割当法の工学的応用について検討し、動的被覆と目標追跡を両立するモバイルセンサネットワークの設計法を提案する。

一方で、大型化・複雑化するシステムに対して、管理者がその行動を直接制御できないエージェントが利己的に振る舞ったとしても、全体として望ましい状態を実現するための利己的マルチエージェント系の制御理論の重要性は今後ますます高まっていくと考えられる。このようなシステムについては、税と補助金を用いて目標状態を実現する制御法が提案されているが、既存手法では、その適用範囲は集団状態が観測可能な場合や、各エージェントが互いの価値観の違いを観測可能な場合に限定されている。そこで、各エージェントの利得が観測できない場合や異なる性質を持つエージェント間で行動の模倣が行われる場合など、補助金のダイナミクスに与える影響が複雑化した場合に対する制御系の設計法を提案する。さらに、その工学的応用にも取り組み、特に、多数のエージェントが始点から終点への経路と出発時刻とを同時に利己的に選択するように拡張した利己的ルーティングの制御に応用する。

3. 研究の方法

本研究は、ゲーム理論的な知見に基づいて、大規模システムを非協力・利己的な相互作用によ

って制御する制御エージェントの設計法の確立と、すでに存在する非協力・利己的エージェント集団の相互作用に介入して目標状態を実現する制御法の確立を目標とする。これらの目的のもと、(1) エージェントの自律的タスク選択に基づく分散的タスク割当法の提案を行い、その成果を用いて (2) 自律分散的タスク割当法の動的被覆・目標追跡問題への応用に取り組む。また、(3) 異種エージェント間での模倣ダイナミクスにおける目標状態の安定化に取り組み、(4) 出発時刻選択を考慮した利己的経路選択の制御に応用する。

(1) エージェントの自律的タスク選択に基づく分散的タスク割当法の提案

多数のエージェントが、エージェント数に対して比較的少数のタスクを協力・分担して実行する状況を考える。このようなタスク割当問題において、割当によって得られる効用は、タスクの性質とエージェントの能力の組合せに強く依存すると考えられる。しかしながら既存研究では、タスクの性質の違いやその実行に必要な能力の高低、エージェントの能力の違いについて十分に考慮されていない。また、独立した制御器（タスクマネージャ）が各エージェントに個別にタスクを割り当てる場合、エージェント数の増加による問題の大規模化に伴って、求解が困難になるという問題が存在する。

そこで本研究では、個別のエージェントが実行するタスクの代わりに、各タスクを実行するエージェントの割合を決定する、多数のエージェントの能力の違いとタスクの性質の違いを考慮した割当問題を定式化し、集団ゲームに基づく解法を提案する。それをもとに、各エージェントが共通の単純な確率的意思決定ルールに従って自律的にタスクを選択することで最適解を求める手法を提案する。さらに、各エージェントが現在実行しているタスクに依存して変更可能なタスクが制限される分散的な状況について検討し、必要に応じて選択可能なタスクを追加することで、得られるタスク割当の大域的最適性を保証する手法を提案する。

(2) 自律分散的タスク割当法の動的被覆・目標追跡問題への応用

多数のモバイルセンサノードによって構成されるモバイルセンサネットワークを用いて、ある特定の領域を動的に監視する動的領域被覆と、領域内の特定の移動対象を追跡する目標追跡の2つの異なるタスクを同時に実行することを考える。

既存手法である Semi-Flocking アルゴリズムでは、すべてのノードが均質で同じ能力を持つと仮定されており、異なる能力を持つ複数種類のノードが協調してタスクを実行する場合には適用することができない。また、目標追跡を行うノードの数は追跡対象ごとにあらかじめ定められた必要ノード数に依存しており、追跡対象の数や被覆性能に合ったタスク割当を自律的に行うことはできない。

そこで本研究では、Semi-Flocking アルゴリズムを、複数種類のノードの共存を考慮したものに拡張し、動的領域被覆を行う「探索」タスクと目標追跡を行う「追跡」タスクに加え、エネルギーコストを節約する「停止」タスクを導入する。さらに、(1) のタスク割当法を応用し、タスクの性質とノードの能力の違いを考慮しつつ、各ノードが自律的にタスクを選択することで全体として最適な、動的領域被覆と目標追跡を両立するタスク割当法を提案する。

(3) 異種エージェント間での模倣ダイナミクスにおける目標状態の安定化

多数の利己的で価値観の異なるエージェントが共存し相互作用する状況では、必ずしもシステム管理者が望む状態が実現されるとは限らない。このため、与えられた目標状態を実現するための税や補助金に基づいた制御法が提案されている。しかしながら、価値観の異なるエージェントが共存し、各エージェントがその違いを認識できない状況で互いに行動を模倣しあう状況については考慮されていない。本研究では、各エージェントが価値観の違いを認識できない状況において、目標戦略分布を実現するための補助金配分法を提案する。

(4) 出発時刻選択を考慮した利己的経路選択の制御

ある地点から別の地点へ行くときに複数の交通手段や経路が存在する場合や、ある端末から別の端末へとデータを伝送する際に複数の経路が存在する場合など、ネットワークを利用する多数のエージェントが自身の旅行時間やデータの伝送遅延を最小化しようと利己的に経路を選択する状況を利己的ルーティングと呼ぶ。利己的ルーティングにおいては、ネットワーク管理者の望むフローが実現されない場合があり、選択経路と全体のフローに依存した通行料を科すことで目標フローを実現する手法が提案されている。本研究では、利己的ルーティングをエージェントが経路だけでなく出発時間帯も選択するモデルに拡張し、集団ゲームによってモデル化する。このモデルは、従来の利己的ルーティングによって議論されている、ある経路にエージェントが集中することでかえって旅行時間が大きくなってしまいうジレンマだけでなく、エージェントの出発時刻の好みによって、一定の時間帯にエージェントの移動が集中することで生じる問題を記述することができる基礎的なモデルである。さらにこのモデルにおいて、出発時間帯と経路に応じた通行料を課すことによって、目標とするフローを実現するとともに、出発時刻を分散させる手法を提案する。

4. 研究成果

本研究では、3 で述べた研究方法に基づき、以下の成果を得た。

(1) エージェントの自律的タスク選択に基づく分散的タスク割当法の提案

多数のエージェントが、エージェント数に対して比較的少数のタスクを協力して実行する際に、自律的に利己的に自身の実行するタスクを決定することで、結果として大域的に最適なタスク割当を実現するタスク割当法の提案を行った。この手法では、複数種類の能力の異なるエージェントの存在を想定し、タスクの性質を表すベクトルとエージェントの能力を表すベクトルの内積をもとに、大域的なタスク割当の性能を評価する評価関数を構成し、この評価関数をポテンシャルとして持つポテンシャルゲームとなるようにエージェントの利得関数を設計した。このゲームにおいては、各エージェントが、すべてのタスクからある共通の単純な確率的意思決定ルールに従って自律的にタスクを選択する場合、タスク割当の時間変化がスミスダイナミクスと呼ばれるダイナミクスで近似でき、結果としてポテンシャル関数の値を最大化するタスク割当が実現できる。しかしながらこの割当法では、エージェントが選択可能なタスクを現在実行しているタスクに依存する（局所的な）ものに限定した場合、選択しているエージェントがいなくなるようなタスクが存在すると、割当の大域最適性が保証されない場合がある。したがって、タスクの割当状況に基づいて選択可能タスクを増加させることで、割当の大域最適性を保証しつつ、別途選択可能タスクを削減することで最適な割当の探索効率を改善するアルゴリズムを提案した。

(2) 自律分散的タスク割当法の動的被覆・目標追跡問題への応用

多数のモバイルセンサノードによって構成されるモバイルセンサネットワークを用いて、ある特定の領域を動的に監視する動的領域被覆と、領域内の特定の移動対象を追跡する目標追跡の2つの異なるタスクを同時に実行するためのタスク割当法を提案した。この手法では、各ノードが、動的領域被覆を行う「探索」タスクと目標追跡を行う「追跡」タスク、エネルギーコストを節約する「停止」タスクから1つを選択すると考える。ノードの性能と各タスクを実行する際に必要とされる性能を、最大速度やセンシング範囲、エネルギー消費をパラメータとするベクトルで表現し、(1) のタスク割当法を応用することで、タスクの性質とノードの能力の違いを考慮しつつ、各ノードが自律的にタスクを選択することで全体として最適な、動的領域被覆と目標追跡を両立するタスク割当法を提案した。また、各タスクの性質ベクトルを調整することで、「探索」や「追跡」、「エネルギー消費の低減」をそれぞれ重視するタスク割当が実現可能であることをシミュレーションにより明らかにした。

(3) 異種エージェント間での模倣ダイナミクスにおける目標状態の安定化

価値観の異なる多数のエージェントが共存し、各エージェントがその違いを認識できない状況で互いに行動を模倣しあう状況において、目標戦略分布を実現するための補助金配分法について検討した。各エージェントが模倣対象候補を集団に依存せずに選択し、利得の高い戦略ほど高頻度で模倣する成功の模倣と、自身の利得との差に比例した確率で模倣する利得差比例模倣の2種類の模倣に基づく戦略分布のダイナミクスに対して積分器を用いた補助金配分率を設計しPI制御を実現した。成功の模倣については、目標状態を実現する補助金額の条件を明らかにした。利得差比例模倣については、理論的に保証された目標状態の安定化条件を示すには至らなかったが、数値シミュレーション上では目標戦略分布の実現が示唆された。

(4) 出発時刻選択を考慮した利己的経路選択の制御

本研究では、利己的ルーティングを、エージェントが経路だけでなく出発時間帯も選択するモデルに拡張し、集団ゲームによってモデル化した。このモデルでは、各エージェントは出発時間帯によって異なる評価値と始点から終点までの旅行時間の差に基づいて、出発時間帯と経路を選択する。このモデルにおいて、出発時間帯の選択と経路の選択の間にはある種の独立性があることを明らかにした。また、出発時間帯の分散と経路選択の制御を同時に実現する交通量を提案し、目標フローの安定化条件を示した。

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1．発表者名 金澤 尚史
2．発表標題 モバイルセンサネットワークにおける動的被覆・目標追跡タスクの集団ゲームに基づく分散割当法
3．学会等名 電気情報通信学会 システム数理と応用研究会
4．発表年 2023年

1．発表者名 金澤 尚史
2．発表標題 レプリケータダイナミクスにおける任意目標状態の定率税に基づく安定化
3．学会等名 電気情報通信学会 システム数理と応用研究会
4．発表年 2024年

1．発表者名 金澤 尚史，志原 隆一郎
2．発表標題 出発時刻選択を考慮した利己的ルーティングに対する積分器を用いた通行料設計について
3．学会等名 電気情報通信学会 システム数理と応用研究会
4．発表年 2022年

1．発表者名 金澤 尚史
2．発表標題 マルチエージェントシステム〜利己的エージェント集団による分散制御系設計〜;
3．学会等名 摂南大学融合科学研究所 第6回研究講演会（招待講演）
4．発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 大樹, 金澤 尚史
2. 発表標題 選択可能タスクの削減を考慮した複数種エージェントに対する大域最適タスク割当法
3. 学会等名 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶山 虎宇, 金澤 尚史
2. 発表標題 集団に依存しない模倣ダイナミクスにおける目標戦略分布実現のための補助金配分法
3. 学会等名 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kou Kajiyama and Takafumi Kanazawa
2. 発表標題 Subsidy-Based Realization of Target Strategy Distribution for Population-Independent Imitative Dynamics
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井 義樹, 金澤 尚史
2. 発表標題 出発時刻選択を考慮した利己的ルーティングに対する各辺の課税額決定法
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 大樹, 金澤 尚史
2. 発表標題 分散スミスダイナミクスに基づいた複数種のエージェントに対する大域最適タスク割当法
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶山虎宇, 金澤尚史
2. 発表標題 集団を区別しない成功の模倣に対するPI制御法
3. 学会等名 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会
4. 発表年 2020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
---------	---------