

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11894

研究課題名(和文) 帰納的ゲーム理論における意思決定過程の論理的解析手法とその応用に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Logical Analysis Methods of Decision Making Processes in Inductive Game Theory and Its Applications

研究代表者

長谷部 浩二 (Hasebe, Koji)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：80470045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：帰納的ゲーム理論において主体の行う推論を、知識論理と呼ばれる様相論理の一種を用いて定式化することを目標に研究を行った。また、上述の知識論理をもとにした論理体系を用いた認識論的ゴシッププロトコルの分析を行った。特に、一部のネットワーク参加者が故障しうることを仮定した場合に、他の参加者がその故障に気づくための認識論的条件を明らかにした。さらに、分散システムにおけるビザンチン將軍問題を解くためのプロトコルにおける故障の特定の条件について分析を行なった。その結果、前述の認識論的ゴシッププロトコルと同様に、受信したメッセージの間の齟齬によって故障を特定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は帰納的ゲーム理論を数理論理学の成果によって補強するという意味で、ゲーム理論の分野において独自性を有するだけでなく、情報科学への応用の観点からも、特に自律分散システム的设计開発に対して有用であると言える。一般に、分散システム的设计は非常に複雑で難しく、各主体の持つ知識やメッセージの交換の方法の微妙な違いによって、目的とする均衡状態の実現の可否が変わってしまう。そのため、数理論理学などの厳密な方法を用いた定式化により、意図通りのシステム的设计が可能となることが期待される。またこのことは、ゲーム理論をもとに既に设计された分散システムの検証法としても新たな可能性を提供するものでもある。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study was to formalize the players' inferences in inductive game theory using epistemic logic. We also analyzed epistemic gossip protocols using the logical system obtained through the above research. In particular, we clarified the epistemic conditions for network participants to notice the failure of other participants. Furthermore, we analyzed the conditions for failure in protocols to solve the Byzantine general problem in distributed systems. The results showed that, similar to the epistemic gossip protocol, faults can be identified by discrepancies between received messages.

研究分野：マルチエージェントシステム

キーワード：帰納的ゲーム理論 知識論理

1. 研究開始当初の背景

ゲーム理論は、複数の主体(プレイヤーもしくはエージェント)が相手の行動を予測しながら自らの利得を最大化するように振る舞う状況をゲームとして一般化した理論である。ゲーム理論における主要な関心事は、ゲーム論的な状況における主体の意思決定過程にある。すなわち、各主体はゲームの構造に関する知識をもとに、そこから演繹的推論によって自らの利得を最大化するように意思決定を行い、さらに行動によって得られた経験や学習によりゲームに関する新しい知識を帰納的に獲得するというサイクルを繰り返す。ゲーム理論の目的は、各主体によるこのようなサイクルの実行とそこから生まれる均衡などの全体性との関係を明らかにすることにあると言える。

しかしながら、伝統的なゲーム理論では、プレイヤーがゲームの構造に関する知識をあらかじめ全て持っているという強い仮定がしばしば置かれてきた。そのため、現実の世界で見られるような、各主体が経験を通じて知識を獲得しながら徐々に「賢く」振る舞うようになるといった現象を十分に捉えることができなかった。こうした帰納的推論の側面を捉える試みとして、金子らは帰納的ゲーム理論と呼ばれる新しい理論を提唱した。この理論において、各主体はゲームを繰り返しプレイしながら徐々にゲームの構造に関する知識を獲得し、独自の主観を形成する。これにより、ゲームの構造に関する先験的な知識や十分な認識能力を持たない主体の意思決定過程と、そこから生じる均衡などの全体性の創発過程を分析することが可能となる。

帰納的ゲーム理論は、不確定状況下での主体の振る舞いに焦点を当てることから、自律分散システムの設計といった現実的な問題を扱う際にも有用であると考えられる。しかしながら、一般に分散制御のメカニズムは非常に複雑であり、システムを意図通り動作させるためのプロトコルの設計開発に応用するために、各主体の行う推論のより厳密な定式化が必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、環境に関する先験的な知識や十分な認識能力を持たない主体を帰納的ゲーム理論によって定式化し、その上で、各主体がゲームをプレイする過程で行う推論を知識論理と呼ばれる論理体系で定式化することを目的とした。これにより、各主体の主観的な知識の形成過程と均衡状態などの全体性の創発過程との関係を、演繹的推論と帰納的推論の双方の果たす役割から明らかにすることを目指した。ここで採用する知識論理を用いるアプローチは、1990年代から2000年代にかけて J. van Benthem らによる意思決定過程の論理的分析手法のアイデアを基にしている。本研究ではこの手法をさらに拡張し、知識の獲得過程を含めた統合的観点からの定式化を目標とした。また、以上で得られた成果を、これまで申請者が研究してきた自律分散システムの設計開発に応用することも目標とした。これにより、環境の変化にも柔軟に対応できる自律分散システムの動作原理の解明を目指し研究が遂行された。

本研究の学術的な意義としては、伝統的なゲーム理論に対して行われてきた論理体系による推論の定式化と帰納的推論の定式化を融合するものである点が挙げられる。これにより、帰納的ゲーム理論を論理体系によって定式化し直し、より厳密な論理的分析を可能にすることを目標とした。

3. 研究の方法

本研究は、帰納的ゲーム理論において主体の行う推論を、知識論理と呼ばれる様相論理の一種を用いて定式化することを目指す。特にここでは、近年のゲーム理論の論理的分析に関する研究で主流となっている動的知識論理を用いず、より簡単な体系による定式化を試みた。これにより、従来の研究に比べ、より見通しが良く決定可能性の観点からも優れた定式化を得ることを目指し研究を遂行した。

より具体的には、知識様相以外のオペレータを持たない命題論理体系をもとに、各主体の戦略や利得の関係といった概念を原子論理式として導入し、また知識様相を用いて主体間の相互の知識に関する命題を記述する。これにより、各時点における主体の知識状態を論理式の集合(公理)として記述することで、主体による意思決定の際の演繹的推論をこの集合から論理体系の推論規則によって表現することができる。

一方、ゲームのプレイによる知識の獲得の過程は、論理体系の外側でメタレベルの規則として定式化する。すなわち、ゲームのプレイのパターンに応じてどのような知識命題が公理として新たに追加されるのかを決めるというアプローチを採用した。

以上で述べた研究は、本研究は帰納的ゲーム理論を数理論理学の成果によって補強するという意味で、ゲーム理論の分野において独自性を有するだけでなく、情報科学への応用の観点からも、特に自律分散システムの設計開発に対して有用であると言える。分散システムの設計でゲーム理論を用いる際の典型的な方法は、うまくゲームのルールを設定することにより、利己的に振る舞う自律的主体が自らの利得を追求すると自然と「均衡状態」として設定されたシステムの望ましい状態へと収束させるというものである。しかし、一般にはこのようなルールの設計は非常に複雑で難しく、各主体の持つ知識やメッセージの交換の方法の微妙な違いによって、目的とす

る均衡状態の実現の可否が変わってしまう。そのため、数理論理学などの厳密な方法を用いて定式化することにより、意図した通りのシステムの設計が可能となる。またこのことは、ゲーム理論をもとに既に設計された分散システムの検証法としても新たな可能性を提供することが期待される。

4. 研究成果

本研究の成果としては、上述の知識論理をもとにした論理体系を用いた認識論的ゴシッププロトコル(epistemic gossip protocol)の分析が挙げられる。ここで対象とするプロトコルは、ネットワーク参加者のそれぞれが持つ秘密の情報を、一対一のコミュニケーションによりネットワーク全体で共有することを目的としたものである。特に、このような状況において一部のネットワーク参加者が故障しうることを仮定した場合に、他の参加者がその故障に気づくための認識論的条件を明らかにすることを目指した。その結果、ネットワーク内でのメッセージの伝達の仕方によって、受信した複数のメッセージの間の齟齬を確認することにより、故障の特定の可能性を特徴づけることができた。以上の成果を取りまとめた論文が、国際会議 ICFEM で採択された。

また、上記の研究をさらに発展させて、分散システムにおけるビザンチン将軍問題を解くためのプロトコルにおける故障の特定の条件について分析を行なった。ここでは特に、Lamport らによって提案された OM というプロトコルを対象とした。その結果、前述の認識論的ゴシッププロトコルと同様に、受信したメッセージの間の齟齬によって故障を特定できることを示した。以上の成果は、国内学会 PPL などでも発表した。

さらに、以上の研究を通じて、今後の研究課題として、ネットワークでつながれた多数のエージェントがゴシップのような局所的なコミュニケーションを行う状況を想定し、その中である知識を得ることに対してインセンティブを持つようなゲームの分析を行うという着想を得た。特に、エージェントはあらかじめゲームの利得の構造を共有知識として持っているのではなく、ゲームを繰り返しプレイするたびに少しずつ帰納的に得るという設定を対象とする。このようなモデルの分析をもとに、コミュニケーションを通じた慣習の創発や意見形成といった問題を明らかにしたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 藤代康誠, 長谷部浩二
2. 発表標題 ビザンチン将軍問題における知識の分析に基づく故障の特定
3. 学会等名 第23回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kosei Fujishiro and Koji Hasebe
2. 発表標題 Robustness and Failure Detection in Epistemic Gossip Protocols
3. 学会等名 22nd International Conference on Formal Engineering Methods (ICFEM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤代康誠, 長谷部浩二
2. 発表標題 メカニズムデザインにおける合理性の認識論理による分析
3. 学会等名 ディペンダブルシステムワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤代康誠, 長谷部浩二
2. 発表標題 メカニズムデザインにおける合理性の認識論理による分析
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Iwasaki and Koji Hasebe
2. 発表標題 A Framework for Generating Playstyles of Game AI with Clustering of Play Logs
3. 学会等名 14th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

マルチエージェントシステム研究室 https://mas.cs.tsukuba.ac.jp

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
---------	---------